

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 05-200888

(43)Date of publication of application : 10.08.1993

(51)Int.Cl. B29C 67/14

(21)Application number : 04-266483

(71)Applicant : EXXON RES &amp; ENG CO

(22)Date of filing : 09.09.1992

(72)Inventor : ANDERSON MICHAEL P  
MONETTE LIZA MARIE ANDREE  
DISMUKES JOHN P  
LING SHIUN  
SROLOVITZ DAVID J

(30)Priority

Priority number : 91 756719 Priority date : 09.09.1991 Priority country : US

(54) COMPOSITES AND METHODS OF MAKING THE SAME

(57)Abstract:

PURPOSE: To provide composites improved in mechanical properties consisting of fiber and matrix by selecting length and aspect ratio of fiber.

CONSTITUTION: In the composites, plural kinds of fibers selected in length are incorporated according to the newly established relation between elastic modulus and cohesive energy of fiber and matrix and critical fiber length. The composites may include means for changing one or more of the above properties in order to reduce the critical fiber length.

## LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 25.08.1999

[Date of sending the examiner's decision of rejection] 18.12.2001

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number] 3366948

[Date of registration] 08.11.2002

[Number of appeal against examiner's decision of rejection] 2002-04679

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection] 18.03.2002

[Date of extinction of right]

## \* NOTICES \*

JPO and NCIP I are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.

2.\*\*\*\* shows the word which can not be translated.

3.In the drawings, any words are not translated.

---

## CLAIMS

---

### [Claim(s)]

[Claim 1] It is the step which calculates the joint model of a composite. (a) Said joint model two or more alienation showing two or more points in the notional fiber of the finite aspect ratio extended in a notional matrix — with the arranged notional joint Two or more functions which express the physical property of said notional fiber and said notional matrix with the correlation of the variation rate and strain energy to each adjacent node of each joint are taken in. The step which prescribes said correlation that said function contains the component said strain energy indicates the shearing stress of said matrix ingredient to be, and calculates the joint model of this composite Furthermore, the step added as said function shows that said notional complex destroys at least one notional deformation under said notional deformation, The step as which destruction of said complex determines the thing accompanied by destruction of fiber, and the thing accompanied by destruction of only a matrix from said function, Until this model shows destruction of only a matrix to the fiber of the 1st aspect ratio and destruction of fiber is shown to the fiber of the 2nd aspect ratio using the model showing the fiber of different die length The step which predicts said 1st aspect ratio and the critical aspect ratio between the 2nd aspect ratio by this including the step which repeats said step, (b) The step as which at least a part chooses the actual fiber of at least 1, and an actual matrix based on the result of said joint model operation step, And (c) The manufacture approach of fiber and the complex incorporating a matrix characterized by including actual selected fiber and the step which forms the actual composite of at least 1 from an actual matrix.

[Claim 2] It is the approach of claim 1 characterized by including the notional bond with which said joint model carries out cross coupling of said notional joint, and for each bond expressing the specific part of said fiber as said notional matrix, and said function including the relation between strain energy and the die length of said bond.

[Claim 3] The approach according to claim 1 that said joint model is characterized by said function including the relation between strain energy and said include angle including whenever [ between said bond / conceptual target angle ].

[Claim 4] The approach according to claim 3 characterized by including the step as which the step which calculates said model determines the strain energy absorbed with said each bond, and the step which determines whether this bond broke by comparing this strain energy with the cohesive energy of said fiber or said matrix.

[Claim 5] The approach according to claim 4 characterized by including the step at which the step which determines the strain energy absorbed with said each bond assigns a part of strain energy relevant to said each include angle between this bond and another bond to said each bond.

[Claim 6] Furthermore, the approach according to claim 1 characterized by said model predicting the critical aspect ratio to two or more combination of fiber and a matrix which has the value from which said parameter differed including the step which repeats the step which said model calculates, and the step to which one or more parameters which specify said fiber, said matrix, or the mechanical characteristics of those both in this repeat are changed.

[Claim 7] Furthermore, this selection step is an approach according to claim 6 characterized by performing so that said parameter to said actual fiber and said actual matrix may become almost

equal to said optimum value including the step which calculates the optimum value of said parameter which gives the minimum value of said critical aspect ratio.

[Claim 8] The approach according to claim 6 characterized by said parameter containing the modulus ratio of said fiber and said matrix.

[Claim 9] The approach according to claim 8 characterized by said parameter containing the cohesive energy ratio of said fiber and said matrix.

[Claim 10] The approach according to claim 9 characterized by including the step which the step to which said parameter is changed chooses according to the well-known physical-properties data which specify the value which can attain physically the value which said modulus ratio and said cohesive energy ratio can take about these ratios.

[Claim 11] Elastics modulus  $E_f$  and int of a proper And two or more fiber which consists of textile materials which have the cohesive energies  $U_f$  and int of a proper Elastics modulus  $E_m$  and int of a proper And cohesive energies  $U_m$  and int of a proper It comes to embed into the matrix which consists of a matrix ingredient which it has. The modulus of elasticity and said cohesive energy of said proper of said ingredient specify the proper joint model criticality aspect ratios  $Sc$ ,  $nm$ , and int by this. Said fiber is the apparent elastics modulus  $E_f$  and app. And apparent cohesive energies  $U_f$  and app It has. Said matrices are the apparent elastics modulus  $E_m$  and app. And apparent cohesive energies  $U_m$  and app It has. The modulus of elasticity of said appearance and the cohesive energy of said appearance specify the apparent joint model criticality aspect ratios  $Sc$ ,  $nm$ , and app by this. At least one side of said matrix and said two or more fiber Complex characterized by having incorporated the physical means in order to adjust either [ at least ] the elastic modulus of the appearance, or apparent cohesive energy to a different value from the value of a corresponding proper so that  $Sc$ ,  $nm$ , and app may become smaller than  $Sc$ ,  $nm$ , and int.

[Claim 12]  $E_f$  and int  $E_m$  and int It is large and said physical means is  $E_m$  and app.  $E_m$  and int Complex according to claim 11 characterized by including a means to adjust to a large value.

[Claim 13] Said  $E_m$  and app Complex according to claim 12 characterized by a means to adjust containing the microparticulate filler distributed in said matrix.

[Claim 14]  $E_f$  and int  $E_m$  and int It is large and said physical means is  $E_f$  and app.  $E_f$  and int It is  $E_{mapp}$  so that it may become small. Complex according to claim 11 characterized by including a means to adjust to adjust.

[Claim 15] It has configurations other than a cylindrical rod with said solid fiber, said physical means has said configuration of said fiber, and said configuration is  $E_f$  and app.  $E_f$  and int Complex according to claim 14 which is the configuration which becomes small.

[Claim 16] Complex according to claim 15 characterized by said fiber being hollow.

[Claim 17] Complex according to claim 11 which said matrix ingredient is an organic material, and is characterized by coming to be chosen out of the group which said textile materials become from carbon and glass.

[Claim 18] Coming to embed two or more fiber into a matrix, said fiber is the apparent elastics modulus  $E_f$  and app. Cohesive energies  $U_f$  and app with which applying is rich Having, said matrices are the apparent elastics modulus  $E_m$  and app. Cohesive energies  $U_m$  and app with which applying is rich Complex with which it has and the elastic modulus of said appearance and cohesive energy of said appearance are characterized by specifying the joint model criticality aspect ratios  $Sc$ ,  $nm$ , and app of appearance smaller than about 25.

[Claim 19] two or more fiber — the inside of a matrix — embedding — becoming — said fiber — apparent elastics modulus  $E_f$  and app having — said matrix — apparent elastics modulus  $E_m$  and app having —  $E_{fapp} / E_m$  and app about 10— complex characterized by being about 20.

[Claim 20]  $E_f$ , app /  $E_m$  and app Complex according to claim 19 characterized by being about 13 — abbreviation 18.

[Claim 21]  $E_f$ , app /  $E_m$  and app Complex according to claim 20 characterized by being about 15.

[Claim 22] Said fiber is the elastics modulus  $E_f$  and int of a proper. The textile materials which it has are included and said matrices are the elastics modulus  $E_m$  and int of a proper. The matrix ingredient which it has is included and they are  $E_{fapp} / E_m$  and int.  $E_f$ , int /  $E_m$  and int Complex according to claim 19 characterized by the small thing.

[Claim 23] Complex according to claim 22 characterized by coming to be chosen out of the group which it is chosen as out of the group which said textile materials become from polyester, aramid, a metallic material, and a nonmetal inorganic material, and becomes, and said matrix ingredient becomes from an organic polymer.

---

[Translation done.]

## \* NOTICES \*

JPO and NCIP I are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

- 1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
- 2.\*\*\*\* shows the word which can not be translated.
- 3.In the drawings, any words are not translated.

---

## DETAILED DESCRIPTION

---

### [Detailed Description of the Invention]

[0001]

[Industrial Application] This invention relates to the complex which comes to incorporate fiber as one phase, and its manufacture approach in more detail about complex and its manufacture approach.

[0002]

[Description of the Prior Art] It is defined as the thing containing two or more phases which have a different physical property from "complex" thru/or "composite material." Usually, these phases consist of a different ingredient. Many of complex has incorporated the fiber which consists of a rigid, generally comparatively high ingredient into the matrix which consists of another, usually more low rigid ingredient. For example, a polymer is strengthened by the fiber which consists of glass, a ceramic, or carbon in many cases, and a metal can be strengthened with the fiber which consists of a ceramic.

[0003] Complex shows the peculiar problem which is not seen with the ingredient of a uniform single phase. There are various limits and a problem of balance in the actual approach of manufacturing composite material and fabricating it in the configuration for which it asks. If the ratio of the volume of the fiber to the volume of a matrix is made into a comparatively small value, using fiber short in comparison, fiber strengthening complex can be manufactured more cheaply in many cases. On the other hand, the physical property of complex like tensile strength or a modulus of elasticity in tension is especially making the volume of fiber increase, and is lengthening fiber length, and often improves. The design of complex often includes taking balance of these elements that compete.

[0004] Affecting the degree to which the die length of fiber resists a surrounding matrix and fiber can support a load like a tension load has been recognized for a long time. Considering the case set on the basis of a tension load which acts on a pad the fiber which has high elongatedness more substantially than a certain matrix ingredient, and acts the whole on this grain direction into this matrix ingredient, such a situation can be explained. Since a load gets across to fiber through the matrix which adjoined soon, all the tension loads that join fiber are directly related to the load currently supported by the field of the matrix ingredient which encloses this fiber soon. When very short fiber is used, the field of the matrix ingredient which encloses fiber soon is comparatively small, therefore its load which gets across to fiber to deformation with a matrix ingredient is also comparatively small. Even when a matrix ingredient deforms till the breaking point, the amount of the load which gets across to fiber is very small. On the contrary, in the case of very long fiber, the matrix ingredient which encloses fiber exists as a remarkable field, and the amount of the load which gets across to the fiber per unit deformation of a matrix ingredient serves as a big value corresponding to die length. For this reason, even when a matrix ingredient carries out comparatively small deformation, a remarkable load will be applied to fiber.

[0005] Even when very short fiber is used, and complex breaks, destroying fiber is not continued, but when very long fiber is used, fiber will be destroyed before complex breaks. Usually, the vocabulary "critical die length" is used as what means the die length of the fiber which forms the boundary between behavior of these two types of destruction. In fiber shorter than critical die length, when the stress to destruction is applied to complex, a matrix ingredient is destroyed in the

condition that fiber is as it is. On the other hand, for fiber longer than critical die length, before a matrix ingredient breaks, fiber is destroyed. The die length of fiber is often expressed by the diameter of the fiber in the die length and the expanding direction of the fiber in the aspect ratio (aspect ratio), i.e., the expanding direction, and a right-angled direction thru/or the ratio with the upper limit. Critical die length can be expressed as a critical aspect ratio.

[0006] It depends for critical die length or a critical aspect ratio on the physical property of textile materials or a matrix ingredient greatly. If extent which can generally improve the physical properties of the reinforcement and others of complex by making fiber length increase becomes longer than critical die length, it will decrease. When complex is constituted combining a specific ingredient with critical fixed die length, and the thing of the fiber length far beyond critical die length is used, it is common for effectiveness to be bad. Such long fiber will give the problem of workability further, without raising not much the property attained in composite material. Therefore, it is desirable to get to know a critical aspect ratio in relation to various combination of fiber and a matrix. Although critical die length can be determined by testing by producing a complex sample, this kind of experimentation spends much time amount, and requires many costs. Moreover, it is desirable to understand the effectiveness when changing the physical property in critical die length a lot.

[0007]

[Means for Solving the Problem and its Function] the voice of this invention — that one [ like ] was accepted and believed with the conventional technique, and — a critical aspect ratio is the monotonous function of a modulus ratio — includes recognition of not being right. While the critical aspect ratio (and critical die length) was the function of a modulus ratio according to this mode of this invention, it became clear that it was the function of the ratio of the cohesive energy of fiber and the cohesive energy of a matrix which are called the "cohesive energy ratio" in this specification. And the specific range of a modulus ratio where a critical aspect ratio will be in the condition near min or it exists to the cohesive energy ratio of arbitration. The ingredient with such a critical aspect ratio that makes min the combination of a modulus ratio and a cohesive energy ratio offers the optimal composite material. The concept that a critical aspect ratio is a smaller value in the set of the complex of these specification is important in many respects. The critical aspect ratio in the combination of these optimal fiber and a matrix can use shorter fiber, unless a critical aspect ratio is exceeded, since it becomes a value smaller than the critical aspect ratio in the combination of other fiber and a matrix. If it has another way of speaking, the optimal complex formed by the fiber and the matrix by this mode of this invention will give balance between physical properties and workability better than other combination. Recognition that the complex with which this mode of this invention has further so far been used typically is out of these suitable range is included.

[0008] the range where an elastic modulus is suitable in the complex which has a suitable cohesive energy ratio — about 10– about 20 — desirable — about 13– about 18 — it is about 15 most preferably. This mode of this invention offers the complex which has the modulus ratio of these suitable within the limits. Preferably, the complex by this mode of this invention can contain inorganic fibers, such as polymer fiber thru/or glass, and carbon, in the real target like the combination of a polymer or a polymer, including an organic matrix ingredient. In the physical property of the proper of a pure organic polymer or typical fiber, an elastic modulus usually becomes what separated from the above-mentioned suitable range. For this reason, the desirable complex by this mode of this invention includes the physical means which changes fiber, a matrix, or its both that the physical property of different appearance from the physical property of the proper of the pure ingredient of fiber, a matrix, or its both should be given.

[0009] In order to determine a critical aspect ratio, the joint model with which complex was improved is used for another mode of this invention. This model includes the notional joint which the plurality showing two or more points in the fiber of at least 1 which has elongation and a limited aspect ratio in the expanding direction within the matrix which encloses fiber estranged. This vocabulary of "being notional" is used in relation to the joint of this model, in order to show not complex with this actual model but that it is the complex expression like a mathematical expression based on a computer in fact.

[0010] Moreover, this model contains two or more functions with which the mechanical property of

fiber and a matrix is expressed as a correlation between the variation rate of each notional joint to each adjoining notional joint, and the force or the strain energy preferably conserved in deformation between these adjacent nodes. that is, the adjacent node of each set of these formulas is relative — a variation rate and the force of acting during these joints — it is preferably related to strain energy. Generally, such a function is based on the mechanical property of an ingredient to which at least the part exists notionally during each joint. These functions are chosen so that the force or strain energy during the joint predicted by this function may contain the component showing the shearing stress in an ingredient. Especially, in a desirable configuration, these joints are arranged at the grid of the shape of the shape of a triangle, and a pyramid, and this model can contain the notional bond (bond) to which cross coupling of the joint of the nearest neighbors in this grid is carried out. It can be feeble and these functions can contain the formula which met such each bond and which specifies the relation between strain energy and the die length of this bond. These functions also include the term showing change of the include angle between bond most preferably. [0011] this voice of this invention — when the desirable approach of depending like adds at least one deformation into a model, this model shows that complex breaks under this notional load or deformation including the step which calculates this model. Preferably, this approach contains the step which repeats the operation like the above until this model shows matrix destruction to the fiber of the 1st aspect ratio by determining whether destruction of complex includes destruction of fiber, or destruction of a matrix using the model showing the fiber of die length different subsequently at least and it shows fiber destruction to the fiber of the 2nd aspect ratio at least. This model predicts a critical aspect ratio as mentioned above.

[0012] Preferably, by the approach by this mode of this invention, at least a part contains further the step which chooses at least one actual fiber and at least one actual matrix based on the result obtained by the operation of this model. As for fiber and a matrix, it is desirable to be chosen so that it may have the physical property as which actual fiber and an actual matrix were expressed by the function of this model, and the physical property which corresponds substantially. Preferably, actual fiber has a larger aspect ratio than the critical aspect ratio predicted with this model at least. Moreover, this approach contains the step which includes actual fiber and an actual matrix in complex.

[0013] The approach by this mode of this invention may also contain the step which repeats the operation of a model while changing further at least one parameter in the model function which specifies the physical property of this model in a continuation operation, and this model predicts the critical aspect ratio to two or more combination of fiber and a matrix which has the value from which at least one parameter changed by the above-mentioned continuation operation differed in this case. As for the step which gives actual fiber and an actual matrix, it is desirable that resemble the mechanical characteristics of a lot at least, and the step which fiber gives actual fiber and an actual matrix so that it may have an aspect ratio equal to the aspect ratio which those actual mechanical characteristics used in the repeat operation of this model, and which this model predicted to the mechanical characteristics of this lot at least at least is included. The approach by this mode of this invention contains most preferably the step which chooses the combination of the optimal mechanical characteristics from which a critical aspect ratio serves as min from two or more combination of the mechanical characteristics used for various operations of this model. That is, the fiber used for actual complex and the mechanical characteristics to which only a matrix is applied express the mechanical characteristics which the model predicted that a critical aspect ratio serves as min or its near about at least one parameter used with this model. Preferably, the parameter used in this model contains the rate of the cohesive energy of fiber of the elastic modulus of the fiber to fiber and the modulus ratio of a matrix, i.e., the elastic modulus of a matrix, of comparatively as opposed to the ratio of the cohesive energy of fiber and a matrix, i.e., the cohesive energy of a matrix.

[0014] Still more nearly another mode of this invention includes recognition that a certain analysis type also predicts the critical aspect ratio to various combination of the physical property of fiber and a matrix. Therefore, the approach of existing by this mode of this invention contains the step which offers the fiber which has the combination of the physical property which calculated the

critical aspect ratio to the various combination of the physical property of fiber and a matrix, chose the combination of the physical property of the fiber which gives min or the critical aspect ratio of that near, and a matrix, and was this chosen further, and complex including a matrix.

[0015] Still more nearly another mode of this invention offers fiber strengthening complex including the fiber formed from the textile materials which have the physical property of a proper respectively, and a matrix ingredient, and a matrix. It turns out that the physical property of the proper of textile materials and a matrix ingredient specifies the joint model criticality aspect ratio of a proper. that is, said model predicts the specific critical aspect ratio of the complex which has a physical property with the fiber and the matrix equal to the physical property of the proper of these ingredients which have been called the proper joint model criticality aspect ratio by this detail letter. In the complex by this mode of this invention, the physical property to which at least one side of a matrix ingredient and fiber includes the physical means which changes the elastic modulus of that appearance, apparent cohesive energy, or its both, consequently applies only fiber and/or a matrix becomes a different thing from the physical property of the own proper of these ingredients. The physical property of this appearance of fiber and a matrix specifies a critical aspect ratio smaller than the above-mentioned proper criticality aspect ratio. Critical aspect ratio which will be obtained if it has another way of speaking and the physical property of this appearance of fiber and/or a matrix will be used in a joint model — In this specification, — called an apparent joint model criticality aspect ratio becomes smaller than the above-mentioned proper joint model criticality aspect ratio. Furthermore, the physical means used in order to change the physical property to which only fiber is applied so that it may argue later can contain the filler incorporated into [ fiber's ] shifting from a simple, straight, and uniform fiber configuration, and/or an own one. Moreover, the physical means which will be carried out in order to change the physical property of a matrix and which is carried out can contain the void in a filler or a matrix. As for such a filler or a void in fiber or a matrix, it is desirable that it is a dimension smaller than microscale, i.e., fiber, or a matrix. In the modification of this approach, the above-mentioned analysis type may prescribe a proper criticality aspect ratio and an apparent critical aspect ratio.

[0016] The ingredient by these modes of this invention includes the description which approaches by the set of the optimal above-mentioned complex. this point — being related — a certain ingredient — this voice of this invention — although it can judge by determining the above-mentioned proper criticality aspect ratio and an apparent in-every-direction criticality aspect ratio using the approach according [ whether it is what is depended like ] to a joint model, or the approach by the analysis type, such a judgment always is not required, in order to produce the ingredient itself.

[0017] These modes of this invention can have and use profitableness for various complex containing one direction discontinuity complex, i.e., the complex with which two or more fiber is prolonged mutual almost in parallel. Although these modes of this invention are applicable to the complex which consists of the textile materials and the matrix ingredients of arbitration mostly, especially in the case of the complex containing the matrix ingredient which consists of an organic compound substantially, i.e., the matrix ingredient with which the amount of [ of a matrix ] principal part consists of an organic material like thermosetting polymer or a thermoplastic polymer, they are effective. As desirable textile materials, a polyether, polyolefine, an organic polymer ingredient like aramid, a metallic material, or a nonmetal inorganic material like glass or carbon is contained.

[0018]

[Example] Much fiber 10 is distributing fiber strengthening complex in a matrix 12. Die-length L and the radius d of the body of these fiber 10 are long and slender. All the fiber in complex has the same die-length L usually at least theoretically. However, there is dispersion in the die length of fiber in actual complex. therefore, when calling it the die length of the fiber in actual multi-fiber composites in this detail in the letter, the value which the die length of the fiber in complex can take most is said, and this is usually the median (median) of the die length of fiber. It should be understood that similarly the vocabulary the "diameter" used about each fiber in complex means the average of the outer diameter of this fiber in a direction perpendicular to the die-length direction of fiber. Although the fiber used in complex is substantially [ often ] cylindrical, the diameter defined in this case here



is a diameter which is usually understood, only concerning a cylinder. The diameter of the fiber in actual multi-fiber composites should be understood to say the thing of the diameter which the various fiber in this complex can take most like the case of die length. The fiber 10 of the complex of drawing 1 is actually an aspect ratio (aspect ratio) Sact. It has. It is an aspect ratio Sact about the fiber in actual complex as used in this specification. It is the ratio of die length to a diameter, namely, is  $Sact = L/d$ .

[0019] It was shown in drawing 1 and, as for complex, the fiber of "one direction" complex, i.e., a large number, is mutually extended to abbreviation parallel. Moreover, the complex of drawing 1 is "discontinuity" fiber composites. That is, much fiber has the die length of finite, therefore it has the aspect ratio of finite. Typically, the die length of each fiber in discontinuity fiber composites is quite smaller than \*\* outside all the complex in the die-length direction of this fiber.

[0020] Extent which receives the diffraction loading which fiber 10 resists a matrix 12 and joins complex changes with the die length of fiber with the physical property of a matrix and fiber again. Critical die length  $L_c$  which both fiber and a matrix destroy to coincidence when a certain tension load is added to complex in the direction of fiber in the combination of the arbitration of a matrix and fiber, as mentioned above It exists. This critical die length  $L_c$  A matrix breaks first by small fiber length, and it is the critical die length  $L_c$ . Fiber breaks first by large fiber length.

[0021] It is typically shown in drawing 2 showing two complex which has one fiber for the phenomenon in connection with destruction of complex. The complex in A, B, and C has fiber 14 embedded at the matrix 16, and this fiber 14 has die length shorter than the critical die length to the combination of this fiber and this matrix. A shows the complex of a no-load and B shows the complex under a tension load smaller than the breaking load of complex. modulus of elasticity in tension  $E_f$  of fiber 14 if it becomes larger than the modulus of elasticity in tension  $E_m$  of a matrix 16 — fiber — a matrix — \*\*\*\* — \*\* Therefore, a matrix shows the inclination which deforms more greatly than fiber. If it has another way of speaking, deformation of a matrix will be restricted to some extent by the force transmitted between fiber and a matrix. This force transmitted between fiber and a matrix gives tension to fiber. This force is limited with the comparatively small elastic modulus of a matrix by deformation of a matrix again. Stress concentration arises at the both ends of fiber. A local matrix destructive zone is made extremely greatly consequently at each edge of fiber by the stress transmitted between a matrix and fiber in this field. The force transmitted between a matrix and fiber increases and the stress concentrated on the both ends of fiber also increases it as the load which joins complex increases gradually. the load which joins complex increases and a matrix deforms the force which gets across to fiber, i.e., the tensile stress in fiber, — be alike and hang — it is only small — it \*\*\*\*\*. Therefore, the load concentrated in the field 18 of the matrix which adjoins the both ends of fiber reaches fracture level, and before fiber 14 breaks, a matrix causes destructive destruction, as shown in 20.

[0022] Although D, downward E, and downward F show same matrix 16' and fiber 14', fiber 14' is quite longer than fiber 14. If the load to add is enlarged gradually, the same phenomenon will happen. And the concentrated load joins field 18' of the matrix of the both ends of fiber 14', and fiber 14' is put on a \*\*\*\* condition according to the load transmitted from a matrix. However, since fiber 14' is comparatively long, the tension load which joins fiber is comparatively large compared with the load concentrated on a matrix, consequently fiber 14' reaches the breaking load before the destructive destruction which a matrix generates in a field 18 (it illustrates to F).

[0023] The vocabulary "critical die length" is  $L_c$  in special fiber length. It means and is  $L_c$ . The fiber of short die-length  $L$  shows the behavior (it illustrates to C) which a matrix destroys, and is  $L_c$ . The fiber of long die-length  $L$  shows the behavior (it illustrates to F) which fiber destroys. It is the aspect ratio Sact smaller than the critical aspect ratio  $Sc$  similarly. For the fiber which it has, only destruction of a matrix takes place to dominance, and it is the critical aspect ratio  $Sc$ . Large aspect ratio Sact For the fiber which it has, destruction of fiber takes place to dominance.

[0024] One mode of this invention is the critical aspect ratio  $Sc$  in various combination of fiber and a matrix. Critical aspect ratio  $Sc$  when the property of the new analysis type and the fiber to predict, and a matrix changes It is in having found out the new analysis type which predicts behavior. It is not required to fully argue about mathematical derivation of these analysis types, in

order to apply many of these relational expression found out newly. However, the general means used when drawing these many relational expression should be understood. Since the true stress distribution in the multi-fiber composites which have two or more fiber allotted by approaching is very complicated, it cannot be processed depending on a simple mathematical technique. Therefore, new relational expression is drawn using a simplified assumption which is called "rarefaction (dilute)" composite, i.e., the composite which is not influenced of the effectiveness that the surrounding stress distribution of each fiber has happened near the next fiber. Each fiber in such a thin composite is served as the fiber of one \*\* exists all over the matrix field of the shape of a cylinder of the radius R which encloses it. R is the distance from the medial axis of a fiber, and the stress in a matrix becomes equal to the average tensile strain of the composite concerned by the medial axis of a fiber here. R is dependent on the property of an ingredient so that it may mention later. Moreover, in deriving such relational expression, an assumption, i.e., an assumption that tensile stress is not transmitted between the matrix front faces which have covered the edge and this edge of fiber, that there is no edge adhesion is made. Furthermore, it is assumed on that fiber and a matrix maintain elasticity, that the boundary between fiber and a matrix is thin to infinity, and this boundary that there is no discontinuity of a strain. that is, the front face of fiber is the same as the matrix surface part to which it does not slide to the matrix front face which meets it, but the edge on the front face of fiber meets it soon rather — it is assumed that extent migration is carried out. [0025] This analysis is performed by three-dimension system of coordinates with the coordinate x in alignment with the longitudinal direction of fiber, and two coordinates [ perpendicular to the longitudinal direction of this fiber namely, ] perpendicular to Coordinate x, or two-dimensional system of coordinates only with the coordinate x in alignment with the longitudinal direction of fiber, and one coordinate of the direction which crosses fiber. In the analysis by two-dimensional system of coordinates, fiber and a matrix take in the assumption of the proper of being the symmetry around fiber length. This assumption is realistic in almost all cases. Two-dimensional system of coordinates are used with the following analysis equations and equations. The coordinate x which met the die length of fiber makes the end of fiber the starting point. That is, it is set to  $x=0$  in the end of fiber, and is set  $x=L$  (L is the die length of fiber) in the other end. The relation between tensile stress  $\sigma_f$  of the fiber in the point x of arbitration and tensile stress  $\sigma_m$  of a matrix in the die-length direction of fiber is as follows according to these assumptions and the usual equilibrium condition (the vector sum of all force which acts on a part with a system is zero) applied to stress analysis.

[Equation 1]

$$\sigma_f(x) = \frac{E_f}{E_m} \sigma_m \left[ 1 - \frac{\cosh \beta (x-L/2) / r_f}{\cosh \beta L / 2 r_f} \right] \quad (I)$$

However, [Equation 2]

$$\beta = \sqrt{\frac{E_m}{2 E_f (1 + \nu_m) (R / r_f - 1)}} \quad (II)$$

It comes out. Moreover,  $\nu_m$  expresses the Poisson's ratio of a matrix, and the distance in which in  $E_m$  the elastic modulus of fiber and  $r_f$  mentioned the elastic modulus of a matrix, and  $E_f$  above, and a radius and R mentioned fiber above among the above-mentioned formula, respectively.

[0026] The relation between shearing stress  $\tau_i$  which exists in the matrix-fiber boundary in the point x of the arbitration in the die-length direction of fiber by the same view, and the tensile stress in a matrix is as follows.

[Equation 3]

$$\tau_i(x) = \beta \frac{E_f}{E_m} \sigma_m \left[ \frac{\sinh \beta (x-L/2) / r_f}{\cosh \beta L / 2 r_f} \right] \quad (III)$$

Here, for the fiber of die length with one assumption exactly equal to the critical die length  $L_c$  which can be taken, I hear that the tensile fracture which happens at the middle point of fiber happens to the tensile fracture and coincidence of a matrix, and it occurs.

[0027] That is, both a matrix and fiber receive stress exactly equal to each breaking stress. That is,

if breaking stress of sigma<sub>m</sub> and a matrix is made [ the stress of fiber / the breaking stress of sigma<sub>f</sub> and fiber ] into sigma<sub>m</sub>\* for the stress of sigma<sub>f</sub>\* and a matrix, it will become sigma<sub>f</sub>=sigma<sub>f</sub>\* and sigma<sub>m</sub>=sigma<sub>m</sub>\* in this case. Each breaking stress of fiber and a matrix is related to such elastic modulus and cohesive energies. If "harmony" assumption, i.e., an assumption that fiber follows Hooke's law, is used, the cohesive energy U<sub>f</sub> of fiber will serve as 2/2E<sub>f</sub> simply (sigma<sub>f</sub>\*). This formula is rewritten as follows.

[Equation 4]

$$\sigma_{f*} = \sqrt{2 E_f U_f} \quad (I V)$$

Similarly, it is [Equation 5].

$$\sigma_{m*} = \sqrt{2 E_m U_m} \quad (V)$$

In the above, U<sub>m</sub> is the cohesive energy of a matrix. here — the ratio of a non-dimension — E — E<sub>f</sub>/E<sub>m</sub> — giving a definition — the same — the ratio of a non-dimension — U is defined as U<sub>f</sub>/U<sub>m</sub>. A degree type is obtained shortly after substituting these formulas and definitions to the above-mentioned formula (I).

[Equation 6]

$$S_c = \frac{1}{\beta} \cosh^{-1} \left[ \frac{E}{E - \sqrt{U E}} \right] \quad (V I)$$

In the above, S<sub>c</sub> is a critical aspect ratio.

[0028] It is based on the assumption that the tensile fracture with pure relational expression VI happens in a matrix. The mechanism of destruction from which others may happen is that destruction by shearing stress becomes superior on the fiber-matrix boundary contiguous to the both ends of fiber. That is, when the maximum stress in fiber reaches the breaking stress of fiber, I hear that shearing stress tau<sub>i</sub> in the end (x= 0) of fiber reaches destructive shearing stress tau<sub>i</sub>\* of a matrix, and there is. A degree type is obtained from these assumptions and Formulas I, and Formula III.

[Equation 7]

$$\tau_i (x=0) = \tau_{i*} = \beta \left[ \frac{\sinh \beta S_c}{\cosh \beta S_c - 1} \right] \sigma_{f*} \quad (V I I)$$

In the above, tau<sub>i</sub> is the destructive shearing stress of a matrix. However, the destructive shearing stress of this matrix is related to the cohesive energy of a matrix like the destructive tensile stress of a matrix. A degree type will be obtained if a harmony assumption thru/or the assumption of Hooke's law are applied again.

[Equation 8]

$$\tau_{i*} = \sqrt{2 G_m U_m} \quad (V I I I)$$

A degree type will be obtained if the above-mentioned formula IV showing the relation between this formula VIII, the destructive tensile stress of fiber, and cohesive energy is used.

[Equation 9]

$$S_c = \frac{1}{\beta} \cosh^{-1} \left[ \frac{c+1}{c-1} \right] \quad (I X)$$

It is here and is [Equation 10].

$$C = \frac{(R/r_f - 1)}{U} \neq 1 \quad (X)$$

It comes out.

[0029] Thus, Formula VI and Formula IX are based on a different assumption about the mechanism of destruction. Thus, drawing 3 shows the critical aspect ratio S<sub>c</sub> predicted from the two above-mentioned formulas, when changing over the range where E is shown about the complex which is U= 2. Clearly, the possible criticality aspect ratio S<sub>c</sub> of the value from which the mechanism of two destruction differed is drawn. The relational expression (that is, setting to a value with E curve of a higher value) which gives the value of a critical larger aspect ratio in the any value in E is

adopted as defining the critical die length drawn analytically. As opposed to the value of  $U$  set to the comparatively low value of  $E$  if it has another way of speaking critical die length are the minimum die length of fiber required in order that fiber may ensure reaching a breaking load before a matrix breaks by \*\*\*\*, and, on the other hand, it sets to the large value of  $E$ . Critical die length is the minimum die length of fiber required in order that fiber may ensure reaching a breaking load before a matrix breaks by shearing at the both ends of fiber.

[0030] the vocabulary the "analytical criticality aspect ratio" used in this detail in the letter is displayed as  $Sc$  and  $ana$  to the combination ( $Em$ ,  $Ef$ ,  $Um$ , Poisson's ratio  $Vm$ ) of a certain physical properties — having — Formula VI or Formula IX — it should be understood that the thing of the critical aspect ratio  $Sc$  determined according to the formula which gives a large value is said.  $ana$  has the minimum value in the specific value of  $E$  to  $U$  of  $Sc$  and arbitration. The value of  $E$  which gives the minimum value here is expressed as  $E_{mins}$ .

[0031] It depends for the result obtained from both the types of Formula IX and Formula VI on the value assigned to Parameter  $R$  in part. This value is used for count of other parameters currently used for these formulas. In the small value of  $E$  below  $E_{mins}$ ,  $R$  is treated as a constant  $R_0$  (when giving a value with the value of Formula VI higher than Formula IX typically). In the larger value of  $E$  than  $E_{mins}$ ,  $R$  is proportional to  $E$  mostly. Therefore,  $R$  is treated as  $R_1E$  ( $R_1$  is a constant). The value of constants  $R_0$  and  $R_1$  cannot be drawn directly, but changes with  $U$ . The value of constants  $R_0$  and  $R_1$  can be determined to a value with  $U$  from two values of the critical die length determined from two values of the critical die length determined from an experiment according to the joint model explained in full detail behind. To the group of the arbitration of such a value of two pieces, one side expresses  $E$  smaller than  $E_{mins}$ , and expresses  $E$  with another side smaller than  $E_{mins}$ .  $R_0$  and  $R_1$  can be obtained by assigning the determined critical die length and the known value of  $E$  and  $U$  to an above-mentioned formula. When an example was described and it asks using the below-mentioned joint model, to  $U=2$ ,  $R_0$  is set to about 12 and  $R_1$  is set to about 0.57. When  $R_0$  and  $R_1$  are determined using a joint model to two values of  $E$ ,  $Sc$  and  $ana$  which are determined according to an above-mentioned formula to other values of  $E$  in the same value of  $U$  become equal substantially with the critical aspect ratio of the joint model to other values of these  $E$ . If it has another way of speaking, if an analysis type is proofread with a joint model in two points, also in another point, the substantially same result will once be produced. Thus, an above-mentioned analysis type can be used in order to calculate a joint model criticality aspect ratio.

[0032] According to another mode of this invention, a joint model can determine the critical aspect ratio of complex. the joint model said here — a physical structure model or an analog computer — it is the thing of a desirable mathematical model rather than it can carry out with a digital computer preferably. The assumption geometry configuration of one model where this mode of this invention was followed is typically shown in drawing 4. This model includes two or more joints 30 mutually combined with two or more bond 32. A joint 30 and bond 32 are notional. That is, although these do not need to exist as a physical format, they are the descriptions with the need of being used in the model and of existing only as a transcription. Joint 30a shows the point within a matrix, and joint 30b shows the point in fiber. Bond 32 expresses the cross coupling during a joint 30 as relation between relative displacement of the point put together in a joint, and the force of acting along with the die length of the straight line between these points. Therefore, the bond between each joint and its nearest-neighbors joint expresses the mechanical property of fiber and a matrix as an interrelation of the variation rate of each joint to each adjacent node, and the force of acting during these joints. With the gestalt shown especially in drawing 4, fiber is modeled as the one body with the diameter of a unit. That is, only the joint of a single tier expresses fiber and the remaining joints express the matrix. Moreover, the model specified as drawing 4 is a two-dimensional model. Thus, although actual fiber is a three-dimension object, it is expressed with a mathematical model by the single joint layer with a two-dimensional model. If it has another way of speaking, the mathematical model does not include the contact which has the field of drawing 4 up and down.

[0033] This model is treated for bond 32 as a tension spring which has a spring constant proportional to the modulus of elasticity in tension of the special material which exists in accordance with the longitudinal shaft of this bond. And each bond 32a which combines joint 30a or

combines joint 30a of a matrix and joint 30b of fiber within a matrix is treated as a spring which has a spring constant proportional to the elastic modulus of a matrix, and bond 32b extended from one joint 30b of fiber to another joint 30b of fiber is treated as a spring which has a spring constant proportional to the elastic modulus of fiber. If it has another way of speaking, the force of a direction in which each bond 32a was met will be made equal to  $E_m(r-r_0)$ .  $r$  expresses the die length of the bond under the conditions made an issue of here, and  $r_0$  expresses the die length of the bond in start conditions or zero strain conditions. Similarly, the force which met this bond is made equal to  $E_f(r-r_0)$  to bond 32b of arbitration.

[0034] Furthermore, since shear resistance of a matrix ingredient is expressed, in this model, it twists and a component or a "three-body" component is included. This torsion component can be considered as a thing showing the torsion spring which combines the crossing bond of each set. Deformation of such each torsion spring shall be proportional to change of the include angle  $\theta$  between the crossing bond of each set, and it is assumed that the spring constant of a torsion spring is  $1/7$  of the elastic modulus  $E_m$  of a matrix ingredient. That is, shear resistance is assumed that a matrix ingredient has the Poisson's ratio of 0.1 further only with regards to the shear nature of a matrix ingredient. If it says about this point, generally Poisson's ratio  $\nu_m$  of a macromolecule matrix will be 0.3, and Poisson's ratio  $\nu_f$  of an actual glass fiber will usually be 0.2. However, since only the joint group of a single tier is used for this model expressing fiber, it is assumed that  $\nu_f$  is 0. Therefore, assuming that  $\nu_m$  is 0.3 means actual relational-expression  $\nu_m - \nu_f = 0.1$ . Torsion is given by  $c(\theta - \theta_0)$  about the crossing bond of each set. Here,  $\theta$  expresses the include angle between the crossing bond, and  $\theta_0$  expresses the include angle of the strain conditions between the same bond, and it is  $c = E_m/10$ . Each bond 32 forms some of nothing, therefore such notional torsion springs for some such a part of crossovers. And bond 32a1 forms four include angles,  $\theta_A$ ,  $\theta_B$ ,  $\theta_C$ , and  $\theta_D$ . Since such each notional include angle  $\theta$  is the function of the location of three joints, it serves as a "three-body" term. For example,  $\theta_A$  of drawing is the function of the location of a joint 30a1, 30b1, and 30b2.

[0035] The total strain energy of this path is given by the degree type.

[Equation 11]

$$H = \frac{1}{2} E_a \sum_{ij} (r_{ij} - r_0)^2 + \frac{1}{2} c \sum_{ijk} (\cos \theta_{ijk} - \cos \theta_0)^2$$

(XI)

$i$  and  $j$  specify all the various bond here, and  $i$ ,  $j$ , and  $k$  specify all include angles.  $r$  expresses the distance between the die length of bond, or the contacts  $i$  and  $j$  of the pair of adjoining arbitration. To  $i$  and  $j$  as which  $E_a$  specifies bond 32a of a matrix, to  $i$  and  $j$  which are  $E_m$  and specify bond 32a of fiber, it is  $E_f$ , and  $r_0$  expresses the start die length of various bond, and it is assumed that these all are equal.  $c$  by which  $\theta_{ijk}$  expresses any one of the above-mentioned include angles, and  $\theta_0$  is assumed to be 60 degrees with the starting value of the include angle is  $E_m/10$  in the spring constant of the above-mentioned torsion spring.

[0036] In this model, the energy related to each bond of arbitration is expressed with a degree type.

[Equation 12]

$$h_{\text{bond}} = \frac{1}{2} E_a (r - r_0)^2 + \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{2} c \sum_{ijk=\text{neighbors}} (\cos \theta_{ijk} - \cos \theta_0)^2 \right]$$

(XII)

$h_{\text{bond}}$  is the energy of the specific bond made into the problem here. The expression " $ijk=\text{neighbors}$ " shows that total is taken covering the include angle between the bond made into the include angle  $\theta$ , i.e., a problem, which the contiguity bond to the bond made into the problem makes, and other bond. For example, total includes the term of  $\theta_A$ ,  $\theta_B$ ,  $\theta_C$ , and  $\theta_D$  about the bond 32a1 of drawing 4. Only one half of the energy relevant to such an adjacent angle contributes to the bond made into a problem in the above-mentioned formula. Thus, the energy  $h_{\text{bond}}$  of specific bond is treated as a thing containing one half of the total energy relevant to elongation of the bond concerned, and the energy relevant to deformation of each adjacent angle.

[0037] This model is operated according to the general scheme shown in drawing 5. The fiber length

evaluated in the specific run of the arbitration of this model shows the description of a specific joint tacitly as a part of fiber or a part of matrix. For example, by adjusting some descriptions of the bond which assumes that a joint 30b3 is included in a matrix rather than the inside of fiber, and is related corresponding to this, this model can be made so that simulation of the shorter fiber may be carried out. The property of a matrix and textile materials is reflected into the cohesive energies  $U_f$  and  $U_m$  of the fiber similarly assumed and a matrix in the assumption value of  $E_m$  and  $E_f$ . By these assumptions, this model performs the cycle of the actuation shown in drawing 5. It is assumed that only the amount chosen as the arbitration which has model structure at the time of an operation start deforms. if it explains using drawing 4 — this — a joint 30a4, 30a5, and 30a6 — as it is — coming out — Joints 307 and 30a — 309 is equivalent to an assumption that only the amount equivalent to the deformation chosen as the above-mentioned arbitration is displaced to the method of the right in accordance with the direction or fiber shaft orientations of 8 and x.

[0038] all of others [ the following operation step ] — according to Formula XI, the location of a joint is chosen so that total strain energy  $H$  may become min. That is, the specific combination of the joint location where  $H$  becomes min is searched for from  $x$  which is in agreement with the deformation 30a4-30a6 assumed above, i.e., the joint location assumed by the above, and 307-309, and the set which consists of a group of all the joint locations  $r$  in the direction (orthogonal axis) of  $y$  that can be taken.

[0039] The bond in this model and the values  $r$  and  $\theta$  of an include angle are uniquely determined to class doubling a joint location. Therefore, the value of  $H$  can calculate based on Formula XII to class doubling the joint in  $x$  and the direction of  $y$ . If it has another way of speaking,  $H$  will be a variable which is a function of  $x$  of the function of all the locations that specify an independent variable, i.e., all joints, and the value of  $y$  location. Thus,  $x$  which gives the minimum value of  $H$ , and the problem which chooses  $y$  value are problems which only calculate the value of the independent several variables relevant to the minimum value of the function of these independent variables. The mathematical technique which calculates the value of the independent variable relevant to the mathematical technique method and this minimum value for calculating the minimum value of the function of independent several variables is known well. These are called "minimization" technique. The thing of the arbitration of such a technique can be used. Generally, they include trying to the combination of various independent variables until the specific combination which produces iteration or trial-and-error, i.e., the minimum value, is found in such techniques. The combination which should be tried is chosen according to either of many well-known mathematical algorithms. The desirable minimum value discovery algorithm is especially indicated by the "numerical formula and science count technique (Nunerical Recipes, The Art of SientificComputing)" Cambridge University issue which is a text written by press (Press) other, 1986, and Chapter 10 about minimization of the function in this text, and maximization. The contents indicated in this chapter are referred to below.

[0040] The minimizing method is processed it being treated in the multi-dimension space defined by two or more independent variables, and performing a series of Rhine minimization (Line minimizations), i.e., by making it move until it chooses a specific straight line in this multi-dimension space and the minimum value local at least is found along with the straight line. The so-called gradient method is used as a guide which chooses the direction of the various straight lines used by these Rhine minimization in the vector which consists of a ground-floor partial differential coefficient of the function in the gradient, i.e., the multi-dimension space, of a function. The so-called minimum method of descent (steepest descent meethod) performs the Rhine minimization in the direction of a certain arbitration, it performs the Rhine minimization further along with the straight line of the direction of the inclination in the place of that local minimum value so that it may find subsequently still more nearly another minimum value, and it repeats this process repeatedly. Finally, although converged to the true global minimum value, since the rate is quite slow, such an algorithm is not a general not much desirable approach. A more desirable minimization technique is called the conjugate gradient method (conjugate gradient method). In this conjugate gradient method, it performs along a series of directions chosen so that the direction where the Rhine minimization follows might serve as conjugate serially. That is, the product with a certain specific

matrix called the vector of such one certain direction and a "HESHIAN" ("Hessian") matrix generates the vector used as zero, when it takes advantaging with the vector following a degree, and such each direction vector passes a local minimum point along with the straight line of the last direction of a vector. Specific Argo RISUMU which performs the minimization by the conjugate gradient method is known well, is the above-mentioned text, especially is indicated by the 305-306th page.

[0041] If the specific joint location which generates the minimum value of strain energy  $H$  with a certain model is chosen as a whole, according to the above-mentioned formula XII, the strain energy relevant to bond will be calculated at the following step. Subsequently the energy  $h_{\text{bond}}$  of each calculated bond is tested according to an individual to the suitable cohesive energy of specific bond. The binding energy of bond 32a of each matrix is compared with the cohesive energy  $U_m$  of a matrix, and the strain energy of fiber bond is compared with the cohesive energy  $U_f$  of fiber. When the strain energy relevant to a certain specific bond exceeds the cohesive energy relevant to the bond, it is considered that the bond [ \*\*\*\* ] was destroyed.

[0042] The procedure of this step is related to the important description of this model. Since the formula of the strain energy relevant to the formula of total strain energy, especially specific bond includes the term which shows tensile stress and shearing stress, this model is reflecting the union destruction which the \*\*\*\* effectiveness and the shear effectiveness construct and is generated as a \*\*\*\*\* result. Supposing it becomes clear that bond breaks in this phase of this model operation, the formula which defines this model will be adjusted in consideration of the destroyed bond. That is, in the count which follows, as for the destroyed bond,  $E_a$  and the adjacent angle  $c$  of bond which were destroyed in the count to which 0 and a modulus of shearing elasticity are assumed that a modulus of elasticity in tension is 0, consequently it follows are assumed to be 0, respectively. If it has another way of speaking, the structure of this model will be readjusted in consideration of the destroyed bond. This model returns to the step which calculates the specific location of the joint which gives the minimum value of total energy  $H$  after such adjustment. It turns out that these new locations usually differ from the location which gives the minimum value of total strain energy to all the bond that is not destroyed.

[0043] After re-calculating the minimum value, the energy of each bond is again calculated to a new joint location, subsequently it is again tested to the proper value of  $U$ , and destroyed another bond is checked. When the bond destroyed further is found, the above-mentioned process is repeated until the count like a \*\*\*\* joint being strange stops generating the bond destroyed more than it. (Setting to either of the count after readjusting count of the beginning of the minimum strain energy, or the formula of a model) If this condition is reached, that result will be checked and it will judge whether the train of whether destructive destruction has taken place and the destroyed bond crossed the matrix completely, and is prolonged. If this judgment result is no, the deformation assumed first will be made to increase and an above-mentioned step will be repeated again.

[0044] This operation cycle is repeated until it is shown that this model has caused destructive destruction. At this time, this model judges whether the mode of destruction, i.e., destruction, has happened from the identity of the destroyed bond only to the matrix, or it has happened to the both sides of a matrix and fiber. After simulating the first destructive destruction, in this model, only the daily dose which was able to determine fiber length beforehand is increased or decreased. It can decide beforehand and this broken daily dose can be made into the constant rate or the rate of a constant ratio of fiber length. If the destructive destruction observed by the fiber length of the used last has taken place only to the matrix, fiber length will be made to increase with this model. If fiber destruction is observed, fiber length will be decreased with this model. After making fiber length fluctuate, in this model, the operation mentioned above is repeated that another destructive destruction by new fiber length should be simulated. This cycle is continued until destruction of only at least one fiber and destruction of only at least one matrix are simulated. Let critical die length or boundary value of destruction of only a matrix, and destruction of fiber be the greatest fiber length which gives destruction of only a matrix, and the middle value of the minimum fiber length which gives fiber destruction. The critical aspect ratio of a joint model is equal to what carried out division of this critical die length for the assumption diameter of fiber. If the diameter of fiber is assumed to



be 1 like the specific model of drawing 4, a critical aspect ratio will become equal to critical die length. Therefore, this model determines a critical aspect ratio to the any value of  $E_f$ ,  $E_m$ ,  $U_f$ , and  $U_m$ .

[0045] The vocabulary "the joint model criticality aspect ratio ( $Sc$ ,  $nm$ , and notation)" used on these specifications means the critical aspect ratio determined by the approach which used the above-mentioned model. The joint model criticality aspect ratios  $Sc$  and  $nm$  are the functions of an elastic modulus  $E$  ( $E=E_f/E_m$ ) and cohesive energy  $U$  ( $U=U_f/U_m$ ) in more detail. thus, the modulus of elasticity of fiber and a matrix and cohesive energy — the ratio of these parameters determines a joint model criticality aspect ratio in more detail.

[0046] A joint model criticality aspect ratio indicates the pattern of the same change substantially to be an above-mentioned analytical criticality aspect ratio to  $U$  and  $E$ . That is, the specific range of an elastic modulus  $E$  where critical die length serves as min exists to the any value of  $U$ . The pattern of change of both an analytical criticality aspect ratio and a joint model criticality aspect ratio is shown in drawing 6 per some values of  $U$ . In drawing 6,  $Sc$  expresses the joint criticality aspect ratios  $Sc$  and  $nm$ . As mentioned above, when the value of  $R0$  and  $R1$  used for count of the analytical criticality aspect ratios  $Sc$  and  $ana$  is proofread to a joint model, the value of  $Sc$  and  $ana$  becomes the same substantially with the value given to the joint model criticality aspect ratio to the same value of  $U$  and  $E$ .

[0047] The dependency to  $U$  and  $E$  of the critical aspect ratio which became clear by the joint model and the analytical technique which were mentioned above offers some very important results, and they are utilized also in this invention. Behavior of an analytical criticality aspect ratio in case  $E$  changes is important. The minimum value carried out clearly exists in the value of  $Sc$ ,  $ana$ ,  $Sc$ , and  $nm$ . the minimum value [ as opposed to / although the actual values of  $Sc$ ,  $ana$ ,  $Sc$ , and  $nm$  differ to the value from which  $U$  differs / the suitable value (about 1– about 5) of  $U$  ] of both  $Sc$ ,  $ana$ ,  $Sc$ , and  $nm$  — about 10– about 20 — it is usually within the limits of about 13 – about 18  $E$ . If it has another way of speaking, in order to give the minimum critical aspect ratio, by the matter which has the ratio which cohesive energy can take with the relation mentioned above, as for fiber and a matrix, it is shown being [ about ] 10 – being [ 20 ] abbreviation, and that it is preferably desirable about 13 – abbreviation 18, and to have the  $E_f/E_m$  value of about 15 still more preferably.

[0048] The value of the modulus of elasticity in tension ( $E_f$ ) of the fiber used by the decision of  $Sc$ ,  $nm$ ,  $Sc$ , and  $ana$  and the modulus of elasticity in tension ( $E_m$ ) of a matrix can be selected and used from the standard physical-properties value reported to the known collection of physical-properties data. Similarly it can take out from the data of this fiber with the diameter usually used for complex with which the value of the cohesive energy  $U_f$  of fiber was also acquired based on the trial of the fiber, and can use. Generally this data is available. Since the defect of typical fiber is very low when the data of cohesive energy are obtained from the trial of fiber, data from the first are not substantially influenced according to an external factor like the defect in a sample. Especially a glass fiber has a quite small rate of a defect from the first, and the data of the cohesive energy of the glass fiber obtained from the breakage test of the fiber carried out good usually reflect the true cohesive energy of fiber. However, most number of defects are included with the sample of a large matrix ingredient of \*\* which is usually used by the test of the physical-properties data for engineering about an ingredient. The value of the cohesive energy obtained from the trial of such a sample turns into a far small value from the value of the cohesive energy obtained by the trial of the sample which does not have a defect substantially. If the value of  $U_m$  which the defect reflected is used with the value of  $U_f$  which does not have a defect substantially, the synthetic value of  $U$  will not reflect the true ratio of the cohesive energy of fiber and a matrix.

[0049] The value of  $U_m$  without the effect of "truth" or a defect can make the microscale sample of a matrix ingredient with the dimension of fiber, and the same dimension, and can obtain it by testing this sample.

[0050] The true value of the ratio of cohesive energy to the combination of the arbitration of textile materials and a matrix ingredient and the true value of  $U_m$  of a matrix ingredient are acquired by performing the physical test of the single fiber thin complex which it comes to include in textile materials with known  $U_f$  of the matrix ingredient which poses a problem. This physical test



determines the critical aspect ratio of the system containing this matrix ingredient and known textile materials. A critical aspect ratio can be used in order to determine the value of proper  $U$  with the value of  $Sc$  and  $nm$  to the known value of  $E_f$  and  $U_m$ , and various combination of  $E$  and  $U$ . Moreover, this value can be used with the known value of  $U_f$ , in order to determine the value of  $U_m$  of a matrix ingredient.

[0051] for example, a carbon fiber — the value of  $E_f$  — 250 — the values of  $GPa(s)$  and  $U_f$  are 0.0405 $GPa(s)$  and the values of  $E_m$  of the matrix ingredient of a pure epoxy resin are 2.7 $GPa(s)$ . Therefore, the value of  $E$  of the system of an epoxy matrix / carbon fiber is  $250/2.7$ , about 92.6 [ i.e., ]. A physical test shows that  $Sc$  of this system is about 62. When these values are used with the data shown with the curve of drawing 6, it is shown that the cohesive energy ratio  $U$  of this system is about 1.5. That is, as for the system which is about 62, the value of  $Sc$  has the value of  $E$  on the curve of  $U=1.5$  by about 92.6. Therefore,  $1.5=U_{carbon\ fibers}/U_{epoxy\ matrix}$  It becomes. It will be set to  $U_{epoxy\ matrix}=0.027GPa$  if the known value of  $U_{carbon\ fibers}$  is assigned. This value of  $U_m$  can be used in order to determine  $Sc$  using the analysis type or joint model mentioned above in relation to a carbon fiber or other fiber.

[0052] Moreover, the above-mentioned result offers the guide for changing complex. As shown in Table 1, the typical complex which includes a glass fiber or fiber like a carbon fiber in a macromolecule matrix, and becomes and which was used before this invention has the property of the proper which gives a critical big aspect ratio.

[0053]

[Table 1]

A glass fiber and a carbon fiber, and a typical thermoplastic polymer and thermosetting polymer  
Elastic modulus of the fiber/polymer of the used complex  $E (= E_f/E_m)$

$E_m$  (GPa) Glass ( $E_f=75GPa$ ) Carbon ( $E_f=250GPa$ ) Thermoplastic polymer PMMA 2.7 28 92

Polycarbonate 2.3 33 106 Polystyrene 2.7 28 92 Thermosetting polymer Polyester 2.0 38 125 Vinyl

ester 2.4 31 104 Epoxy 2.7 28 92 [0054] For example, the contact mode criticality aspect ratio of the

complex which contains a carbon fiber ( $E_f=250GPa$ ,  $U_f=0.091GPa$ ) in an epoxy matrix ( $E_m=2.7GPa$ ,  $U_m=0.027GPa$ ) is about 62. However, the theoretical complex with another value of  $E$  and/or  $U$  has a smaller critical aspect ratio so that drawing 6 may see. By the system of  $U=1.5$ , the minimum value of  $Sc$  is about 11–12, and this is about generated from  $E=10$  to  $E=15$ . If it has another way of speaking, the system of this epoxy matrix / carbon fiber is not the optimal about a critical aspect ratio. In the case of the complex of the same pure epoxy resin matrix and a glass fiber with  $E_f=250GPa$  and  $U_f=0.091GPa$ , about 28  $U$  is set to about 3.3 by  $E$ . At this time, a critical aspect ratio is about 82. However,  $Sc$  of the complex of  $U=3.3$  and the minimum value of  $nm$  are smaller than 50, and this produces  $E$  from about 11 in 15. The critical aspect ratio of other same complex using other polymer matrices becomes this  $Sc$  obtained, and the minimum value of  $nm$  and the thing which was far different widely similarly.

[0055] According to still more nearly another mode of this invention, the physical means which changes the property of fiber, a matrix, or its both into complex is included, and fiber, a matrix, or its both can show the peculiar property of pure solid textile materials or a pure solid matrix ingredient, and a clearly different property. This modification is chosen so that the critical aspect ratio decided with the property to which only fiber and a matrix are applied may become smaller than the critical aspect ratio decided with the peculiar property of textile materials and the matrix ingredient itself. If it has another way of speaking, the physical means included in fiber or a matrix will change the method of an operation of these matter so that these ingredients may have a different physical property from the property of a pure solid ingredient. These different physical properties produce a smaller critical aspect ratio. The virtual complex incorporating the various physical means which can be used in order to attain this purpose is shown in drawing 7. One fiber 40 is formed from textile materials with the moduli of elasticity in tension  $E_f$  and int of a proper. Fiber 40 has the inner hole 42 by hollow. Fiber 40 has the spring constant smaller than the solid fiber of the same ingredient. And fiber 40 acts like the solid fiber formed from the ingredient with  $E_f$  of a smaller value. The value of  $E_f$  required in order to offer solid cylindrical fiber with the same outer diameter  $d$  as this smaller value—fiber 40 of  $E_f$  and the same tension spring constant is expressed as the elastics modulus  $E_f$

and app which only fiber 40 applies here. If it has other ways of speaking, fiber 40 will act like the solid fiber formed from the ingredient with the apparent elastic modulus  $E_f$  and app. And an inner hole 42 changes the elastic modulus to which only fiber 40 is applied, and is decreasing the elastic modulus of this appearance to the values  $E_f$  and app of appearance smaller than the elastic modulus  $E_f$  and int of the proper of the ingredient which constitutes fiber effectively. Another fiber 44 contains the heart 46 of a low elastic modulus, and this heart 46 decreases effectively the elastic modulus of the proper of the ingredient which constitutes fiber 44. Furthermore, fiber 48 has a flection and is decreasing considerably the elastic modulus to which this flection is decreased considerably and applies the rigidity at the time of the tension of fiber only for fiber. It can use in order to decrease the elastic modulus to which only textile materials apply other fiber gestalten. For example, it may be formed so that fiber may contain a void etc.

[0056] Moreover, it can change so that the elastic modulus of a proper in which the matrix ingredient itself [ this ] also has a matrix, and a different elastic modulus may be shown. For example, the impalpable powder 50 of the filler of a rate of high elasticity like a particle which has a diameter quite smaller than the diameter of fiber in the matrix ingredient 52 can be incorporated, and the elastic modulus over which only a matrix ingredient is covered can be made to increase. In the case of the complex which incorporated glass or fiber like carbon into an organic matrix like a thermoplastic polymer or a heat-curing polymer, it is desirable to decrease the elastic modulus of fiber and to make the elastic modulus of a matrix increase generally so that clearly from Table 1 and drawing 6 . When an elastic modulus  $E$  is in the low minimum range side in other complex, modification opposite to the above is desirable. These modification that changes the elastic modulus to which only fiber or a matrix is applied may change the cohesive energy to which only the component of one side or both is applied. The physical properties ( $E_f$ , app; $E_m$ , app; $U_f$ , app, and  $U_m$ , app) to which only the result is applied determine mutually cooperatively the joint model criticality aspect ratios  $Sc$  and  $nm$  of appearance smaller than the joint model criticality aspect ratios  $Sc$ ,  $nm$ , and int of the proper decided according to the physical property of the proper of a matrix ingredient pure textile materials and own [ pure ]. As mentioned above,  $Sc$ ,  $nm$ , int, and  $Sc$ ,  $nm$  and app are determined by any [ the operation of a joint model or ] of use of an analysis type they are.

[0057] Of course, according to the mode of this invention of a certain kind, even if it does not actually calculate, it can carry out. for example, — if proper modification actually turns into right modification of the ingredient itself — this — a proper change can be made, without calculating. The count mentioned above and a model can be used in order to determine whether a certain specific modification was successful or to be desirable.

[0058] The analysis type mentioned above and a joint model are directly utilizable for a design thru/or manufacture of fiber with the physical property to which only a certain specification is applied, and the complex which consists of matrices. the prediction criticality fiber length halfbeak decided with the manufacture approach of this complex choosing the physical property to which only true fiber and a true matrix are applied, and calculating a critical aspect ratio using such an analysis type and/or a joint model and an analysis type, or a joint model — in order to ask for actual large fiber length — this — it includes calculating actual fiber length. Subsequently, selected fiber and the selected matrix are included in actual complex by conventional complex manufacturing technology like the mold method or casting.

[0059] The analytical criticality aspect ratio and joint model criticality aspect ratio which were mentioned above are drawn using the assumption of thin complex. The actual critical aspect ratio of multi-fiber composites with large concentration is best approximated to a joint mode criticality aspect ratio a scale factor and by multiplying by about 24 typically. And in order to guarantee that fiber is used effectively, as for the aspect ratio of the actual fiber in complex with large concentration, it is desirable that it is the about 24 ( $Sc$ ,  $nm$ ) above. The aspect ratio of desirable actual fiber is under 30 ( $Sc$ ,  $nm$ ). It is what should be careful of that the value of  $E$  and  $U$  which gives the minimum criticality aspect ratio to thin complex can be effectively employed also in complex with large concentration about this point. That is, as for the physical properties which give Min  $Sc$  with the thin complex diluted as mentioned above, complex with large concentration also gives Min  $Sc$ .

[0060] Even if an above-mentioned joint model omits the assumption of a certain kind used for the shown suitable joint model, it can deform. For example, a joint model can be made to transform multi-complex with large concentration by incorporating many joints that a simulation should be carried out more soon rather than it expresses more fiber. However, this serves as the effectiveness of making computer processing time amount required in order to carry out a model increasing considerably. Moreover, clearly, a matrix and fiber can incorporate the additional phase like a different intermediate phase of a property between a matrix and fiber, and a joint model can change them. In this case, the bond and the include angle in the model which simulates the field of complex occupied by the intermediate phase are assigned as a suitable value of  $E_a$  and  $c$  in Formula XI and Formula XII. Moreover, although geometric arrangement [ \*\*\*\* / the joint shown in drawing 4 ] is desirable, it is not limited to this. Equivalent arrangement may be used mathematically [ others ]. A form is used although the formulas which are equivalent to Formula XII about other arrangement of such arbitration differ. Moreover, although this model is preferably performed with a digital computer, other model techniques can also be used for it.

---

[Translation done.]

**\* NOTICES \***

JPO and NCIP are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.

2.\*\*\*\* shows the word which can not be translated.

3.In the drawings, any words are not translated.

---

**DESCRIPTION OF DRAWINGS**

---

[Brief Description of the Drawings]

[Drawing 1] It is the outline sectional view of complex.

[Drawing 2] It is this schematic drawing of the idealized complex in which the mode of destruction is shown.

[Drawing 3] It is the graph which shows a certain relation used in the example of this invention.

[Drawing 4] It is drawing showing some models used in another example of this invention.

[Drawing 5] It is the operation flow chart of the model of drawing 4 .

[Drawing 6] It is the graph which shows another relation used by the example with this invention.

[Drawing 7] It is the same drawing as drawing 1 showing the complex by still more nearly another example of this invention.

---

[Translation done.]

\* NOTICES \*

JPO and NCIP are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

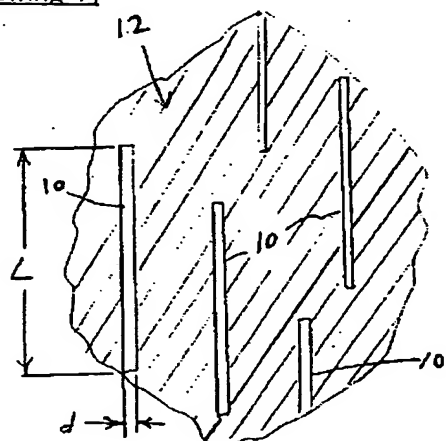
1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.

2.\*\*\*\* shows the word which can not be translated.

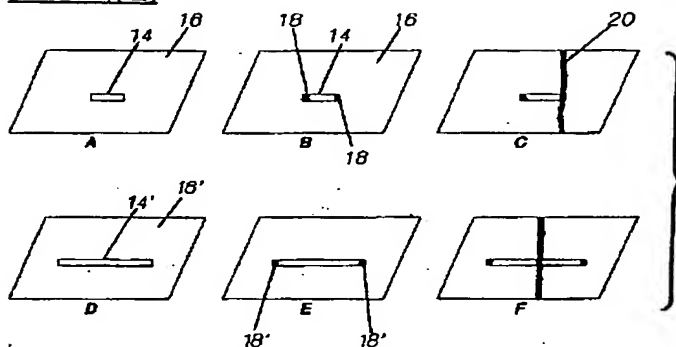
3.In the drawings, any words are not translated.

DRAWINGS

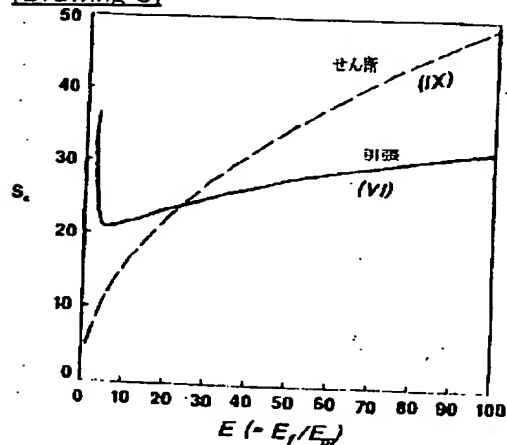
[Drawing 1]



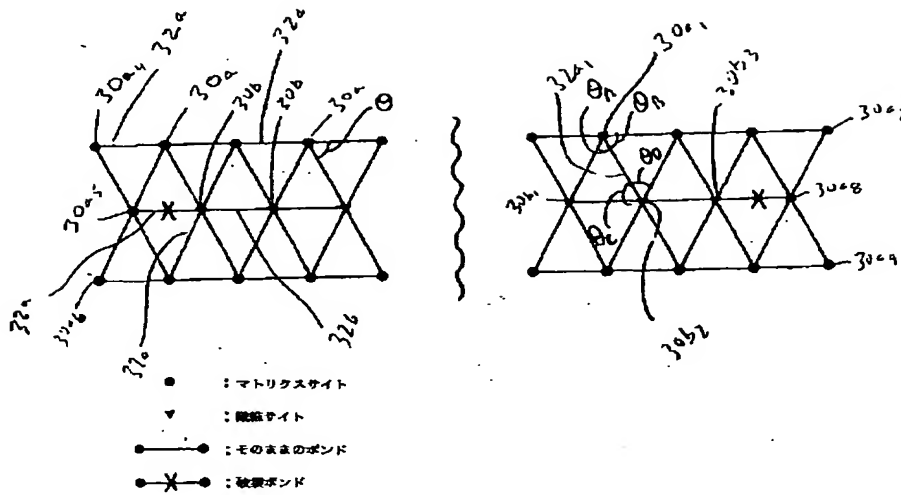
[Drawing 2]



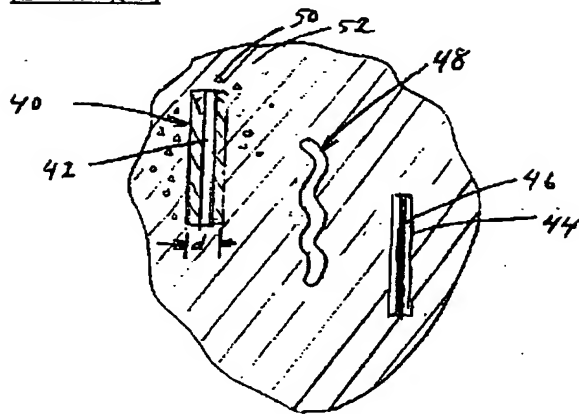
[Drawing 3]



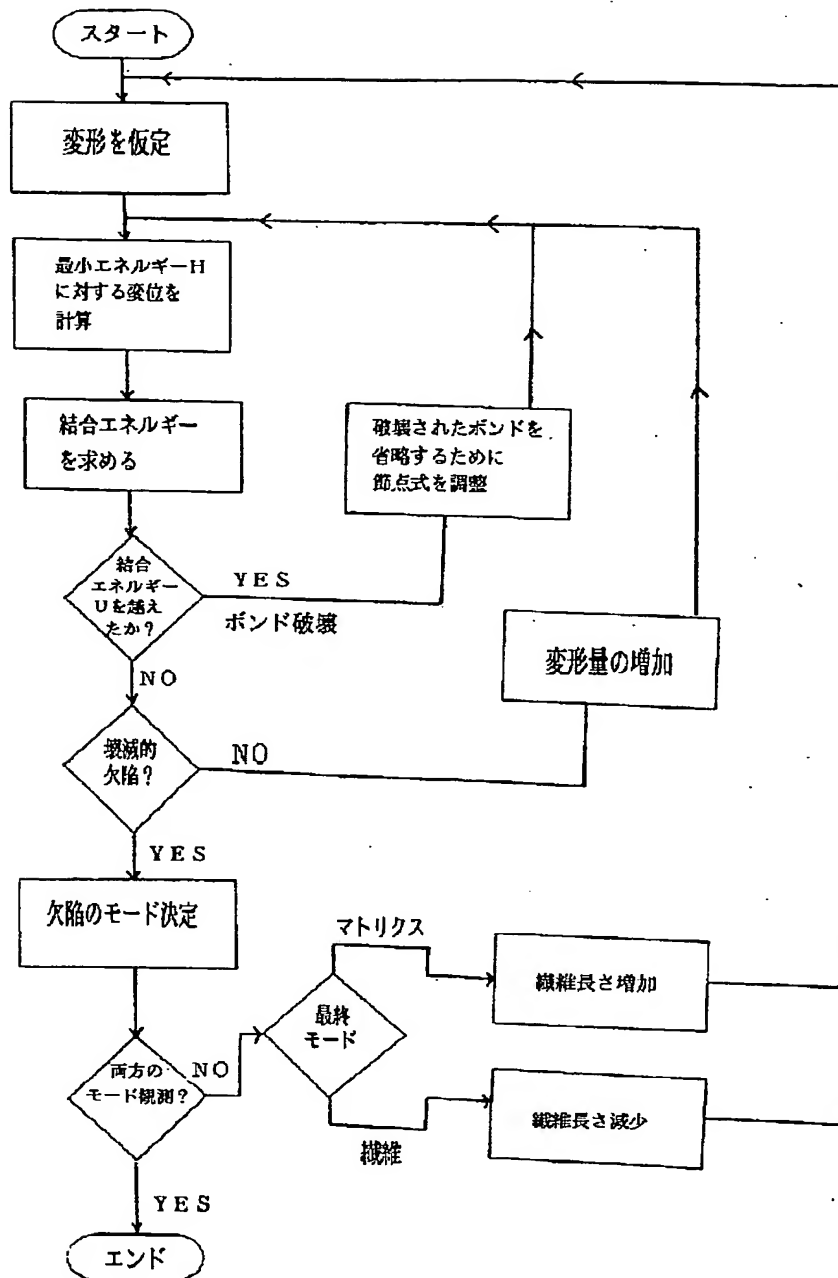
[Drawing 4]



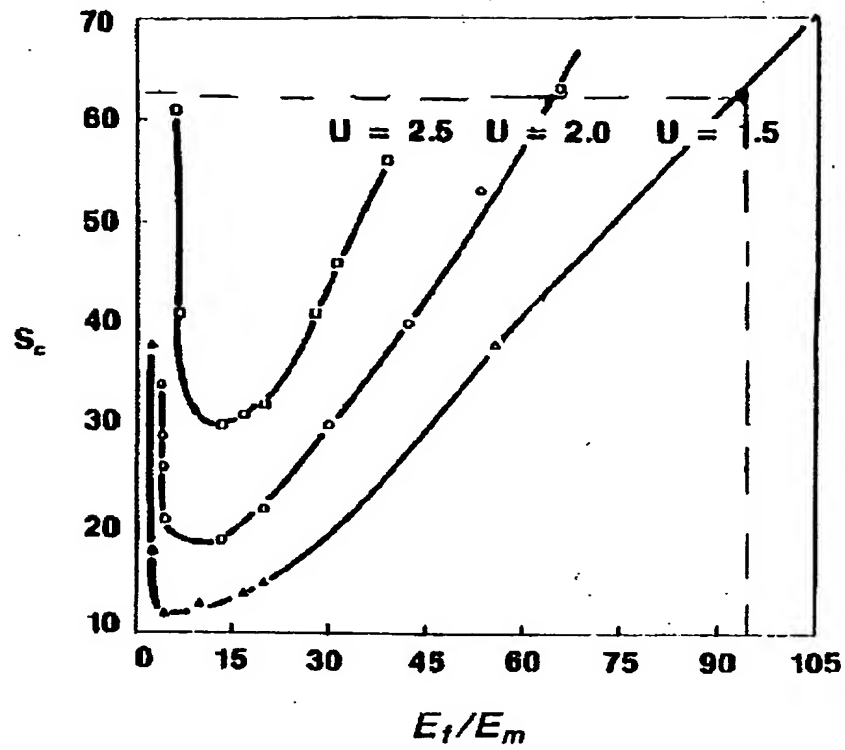
[Drawing 7]



[Drawing 5]



[Drawing 6]



[Translation done.]



(19)日本国特許庁(JP)

(12)公開特許公報(A)

(11)特許出願公開番号

特開平5-200888

(43)公開日 平成5年(1993)8月10日

(51)Int.Cl.<sup>5</sup>

B 2 9 C 67/14

識別記号

庁内整理番号

F I

技術表示箇所

Z 7188-4F

審査請求 未請求 請求項の数23(全 19 頁)

(21)出願番号 特願平4-266483

(22)出願日 平成4年(1992)9月9日

(31)優先権主張番号 7 5 6, 7 1 9

(32)優先日 1991年9月9日

(33)優先権主張国 米国(US)

(71)出願人 390023630

エクソン・リサーチ・アンド・エンジニア  
リング・カンパニー

EXXON RESEARCH AND  
ENGINEERING COMPANY

アメリカ合衆国 ニュージャージー州フロ  
ラム・パーク。パーク・アベニュー180

(72)発明者 マイケル ボール アンダーソン

アメリカ合衆国、ニュージャージー州、ジ  
ェレット、ロング ヒル ロード 92

(74)代理人 弁理士 池浦 敏明 (外1名)

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 複合体及びその製造方法

(57)【要約】

【目的】 繊維長さ及び繊維の縦横比を考慮に入れて機械的特性によりすぐれた繊維とマトリクスからなる複合体を提供する。

【構成】 繊維とマトリクスの弾性率、凝集エネルギー及び臨界繊維長さの間の新規な関係に従い、繊維長さの選択された複数の繊維を組込んだ複合体。この複合体は臨界繊維長さを減少させるためにこれらの性質の1以上の性質を変化させるための手段を含むことができる。

## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 (a) 複合物の節点モデルを演算するステップであって、前記節点モデルは、概念的なマトリクス中に伸びる有限縦横比の概念的繊維中の複数の点を表わす複数の離間配置した概念的節点と、前記概念的繊維及び前記概念的マトリクスの物理特性を各節点の各隣接節点に対する変位とひずみエネルギーとの相関関係で表わす複数の関数を取入れ、前記関数は前記ひずみエネルギーが前記マトリクス材料のせん断応力を示す成分を含むように前記相関関係を規定し、該複合物の節点モデルを演算するステップは、更に、少なくとも1つの概念的変形を、前記概念的複合体が前記概念的変形のもとで破壊することを前記関数が示すように加えるステップと、前記関数から、前記複合体の破壊が繊維の破壊を伴うものか、マトリクスのみの破壊を伴うものかを決定するステップと、異なる長さの繊維を表わすモデルを用い、該モデルが第1の縦横比の繊維に対してマトリクスのみの破壊を示しかつ第2の縦横比の繊維に対して繊維の破壊を示すまで、前記ステップを繰り返すステップとを含み、これにより前記第1の縦横比及び第2の縦横比の間の臨

界縦横比を予測するステップ、  
(b) 前記節点モデル演算ステップの結果に少なくとも一部は基づいて少なくとも1の実際の繊維と実際のマトリクスを選択するステップ、及び  
(c) 選択された実際の繊維と実際のマトリクスから少なくとも1の実際の複合物を形成するステップを含むことを特徴とする、繊維とマトリクスを組み込んだ複合体の製造方法。

【請求項2】 前記節点モデルが前記概念的節点を相互結合する概念的ボンドを含み、各ボンドは前記概念的マトリクスと前記繊維の特定の部分を表わし、かつ前記関数がひずみエネルギーと前記ボンドの長さとの間の関係を含むことを特徴とする請求項1の方法。

【請求項3】 前記節点モデルが前記ボンド間の概念的角度を含み、前記関数がひずみエネルギーと前記角度との間の関係を含むことを特徴とする請求項1に記載の方法。

【請求項4】 前記モデルを演算するステップが、前記各ボンドにより吸収されるひずみエネルギーを決定するステップと、該ひずみエネルギーを前記繊維又は前記マトリクスの凝集エネルギーと比較することにより、該ボンドが破壊したか否か決定するステップを含むことを特徴とする請求項3に記載の方法。

【請求項5】 前記各ボンドにより吸収されるひずみエネルギーを決定するステップが、前記各ボンドに、該ボンドと別のボンドとの間の前記各角度に関連するひずみエネルギーの一部を割り当てるステップを含むことを特徴とする請求項4に記載の方法。

【請求項6】 更に、前記モデルの演算するステップを繰り返すステップと、この繰り返しにおいて前記繊維、

前記マトリクス又はその両方の機械的性質を規定する1以上のパラメータを変化させるステップを含み、前記モデルが前記パラメータの異なった値を有する、繊維とマトリクスの複数の組み合わせに対する臨界縦横比を予測することを特徴とする請求項1に記載の方法。

【請求項7】 更に、前記臨界縦横比の最小値を与える前記パラメータの最適値を求めるステップを含み、該選択ステップは、前記実際の繊維及び前記実際のマトリクスに対する前記パラメータが前記最適値とほぼ等しくなるように実行されることを特徴とする請求項6に記載の方法。

【請求項8】 前記パラメータが前記繊維と前記マトリクスの弾性率比を含むことを特徴とする請求項6に記載の方法。

【請求項9】 前記パラメータが前記繊維と前記マトリクスの凝集エネルギー比を含むことを特徴とする請求項8に記載の方法。

【請求項10】 前記パラメータを変化させるステップが、前記弾性率比と前記凝集エネルギー比のとりうる値を、これらの比について物理的に達成できる値を規定する公知の物性データに従って選択するステップを含むことを特徴とする請求項9に記載の方法。

【請求項11】 固有の弾性率 $E_{f,int}$ 及び固有の凝集エネルギー $U_{f,int}$ を有する繊維材料からなる複数の繊維を、固有の弾性率 $E_{m,int}$ 及び固有の凝集エネルギー $U_{m,int}$ を有するマトリクス材料からなるマトリクス中に埋め込んでなり、これにより前記材料の前記固有の弾性率及び前記凝集エネルギーは固有節点モデル臨界縦横比 $S_{c,nm,int}$ を規定し、前記繊維はみかけの弾性率 $E_{f,app}$ 及びみかけの凝集エネルギー $U_{f,app}$ を有し、前記マトリクスはみかけの弾性率 $E_{m,app}$ 及びみかけの凝集エネルギー $U_{m,app}$ を有し、これにより前記みかけの弾性率及び前記みかけの凝集エネルギーはみかけの節点モデル臨界縦横比 $S_{c,nm,app}$ を規定し、前記マトリクスと前記複数の繊維の少なくとも一方は、 $S_{c,nm,app}$ が $S_{c,nm,int}$ より小さくなるように、そのみかけの弾性率及びみかけの凝集エネルギーの少なくとも一方を、対応する固有の値とは異なる値に調整するために物理的手段を組み込んでいることを特徴とする複合体。

【請求項12】  $E_{f,int}$ が $E_{m,int}$ より大きく、かつ前記物理的手段が $E_{m,app}$ を $E_{m,int}$ より大きい値に調整する手段を含むことを特徴とする請求項11に記載の複合体。

【請求項13】 前記 $E_{m,app}$ を調整する手段が前記マトリクス中に分散された微粒状の充填材を含むことを特徴とする請求項12に記載の複合体。

【請求項14】  $E_{f,int}$ が $E_{m,int}$ より大きく、かつ前記物理的手段が $E_{f,app}$ が $E_{f,int}$ より小さくなるように $E_{m,app}$ を調整する調整する手段を含むことを特徴とする請求項11に記載の複合体。

【請求項15】 前記繊維がソリッドな円柱状ロッド以外の形状を有し、前記物理的手段が前記繊維の前記形状を有し、前記形状が $E_{f,app}$  が $E_{f,int}$  より小さくなるような形状である請求項14に記載の複合体。

【請求項16】 前記繊維が中空であることを特徴とする請求項15に記載の複合体。

【請求項17】 前記マトリクス材料が有機材料であり、かつ前記繊維材料が炭素及びガラスからなる群より選ばれてなることを特徴とする請求項11に記載の複合体。

【請求項18】 複数の繊維をマトリクス中に埋め込んでなり、前記繊維はみかけの弾性率 $E_{f,app}$  とみかけの凝集エネルギー $U_{f,app}$  を有し、前記マトリクスはみかけの弾性率 $E_{m,app}$  とみかけの凝集エネルギー $U_{m,app}$  を有し、前記みかけの弾性率と前記みかけの凝集エネルギーが約25より小さいみかけの節点モデル臨界縦横比 $S_{c,nm,app}$ を規定することを特徴とする複合体。

【請求項19】 複数の繊維をマトリクス中に埋め込んでなり、前記繊維はみかけの弾性率 $E_{f,app}$  を有し、前記マトリクスはみかけの弾性率 $E_{m,app}$  を有し、 $E_{f,app}/E_{m,app}$  が約10～約20であることを特徴とする複合体。

【請求項20】  $E_{f,app}/E_{m,app}$  が約13～約18であることを特徴とする請求項19に記載の複合体。

【請求項21】  $E_{f,app}/E_{m,app}$  が約15であることを特徴とする請求項20に記載の複合体。

【請求項22】 前記繊維が固有の弾性率 $E_{f,int}$  を有する繊維材料を含み、前記マトリクスが固有の弾性率 $E_{m,int}$  を有するマトリクス材料を含み、 $E_{f,app}/E_{m,int}$  が $E_{f,int}/E_{m,int}$  よりも小さいことを特徴とする請求項19に記載の複合体。

【請求項23】 前記繊維材料がポリエステル、アラミド、金属材料及び非金属無機材料からなる群より選ばれてなり、かつ前記マトリクス材料が有機ポリマーからなる群より選ばれてなることを特徴とする請求項22に記載の複合体。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】 本発明は複合体及びその製造方法に関し、更に詳しくは繊維を一つの相として組込んでなる複合体及びその製造方法に関するものである。

【0002】

【従来の技術及び発明が解決しようとする課題】 「複合体」ないし「複合材料」とは、異なる物理特性を有する2以上の相を含むものと定義される。通常これらの相は異なった材料からなる。複合体の多くは、概して比較的高い剛性の材料からなる繊維を、通常はより低い剛性の別の材料からなるマトリクス中に組込んでいる。例えば、ポリマーはガラス、セラミック又は炭素からなる繊維によって強化されることが多く、また金属はセラミッ

クからなる繊維で強化することができる。

【0003】 複合体は、均一な単一相の材料では見られない独特な問題を示す。複合材料を製造し、所望する形状に成形する実際の方法には種々の制限ならびに均衡の問題がある。比較的に短い繊維を用い、かつ、マトリクスの体積に対する繊維の体積の比率を比較的小さい値にすると、繊維強化複合体をより安価に製造できることが多い。これに対し、引張強度や引張弾性率のような複合体の物理特性は、繊維の体積を増加させることで、また特に繊維長さを長くすることで、しばしば改善される。複合体の設計はこれらの競合する要素の均衡をとることをしばしば包含する。

【0004】 繊維の長さが、周囲のマトリクスに抗して繊維が引張荷重のような荷重を支持できる度合に影響を与えることが、長い間、認識されてきている。このような状況は、あるマトリクス材料より実質的に高い伸長度を有する繊維を該マトリクス材料中に埋込み、その全体を該繊維方向に作用する引張荷重のもとにおいたケースを考えれば説明できる。荷重は直に隣接したマトリクスを介してのみ繊維に伝わるので、繊維に加わる全引張荷重は、該繊維を直に取囲んでいるマトリクス材料の領域によって支持されている荷重に直接関係する。非常に短い繊維を用いた場合、繊維を直に取囲んでいるマトリクス材料の領域は比較的小さく、従ってマトリクス材料のある変形に対して繊維に伝わる荷重も比較的小さい。マトリクス材料が破壊点まで変形した場合でも、繊維に伝わる荷重の量は非常に小さい。逆に、非常に長い繊維の場合には、繊維を取囲んでいるマトリクス材料はかなりの領域として存在し、マトリクス材料の単位変形量当たりの繊維に伝わる荷重の量は長さに対応して大きな値となる。このため、マトリクス材料が比較的小さな変形をした場合でも、繊維にはかなりの荷重がかかることになる。

【0005】 非常に短い繊維を用いた場合は、複合体が破壊したときでも繊維は破壊しないままであるが、非常に長い繊維を用いた場合には、繊維は複合体が破壊する前に破壊してしまう。通常、「臨界長さ」という用語が、これら2つのタイプの破壊のふるまいの間の境界を形成する繊維の長さを意味するものとして使用される。臨界長さより短い繊維では、複合体に破壊までの応力を加えたとき、繊維はそのままの状態でもマトリクス材料は破壊する。一方、臨界長さより長い繊維では、マトリクス材料が破壊する前に繊維は破壊する。繊維の長さはしばしばその縦横比（アスペクト比）、即ちその伸長方向における繊維の長さとその伸長方向と直角な方向における繊維の直径ないし最大寸法との比率で表現される。臨界長さは臨界縦横比として表現することができる。

【0006】 臨界長さや臨界縦横比は繊維材料やマトリクス材料の物理特性に大きく依存する。一般的に、繊維長さを増加させることにより複合体の強度その他の物性

を改良できる程度は、臨界長さより長くなると減少する。一定の臨界長さを持つ特定の材料を組合せて複合体を構成した場合、臨界長さははるかに越えた繊維長さのものをを用いると効率が悪いことが多い。このような長い繊維は、複合材料において達成される特性をあまり向上させることなく、更に加工性の問題を与えることとなる。従って、繊維とマトリクスとの様々な組合せに関連して臨界縦横比を知ることが望ましい。臨界長さは、複合体サンプルを作製してテストを行うことにより決定することができるが、この種の実験作業は多くの時間を費し、かつ多くの費用を要する。また、臨界長さにおける物理特性を大きく変化させたときの効果を理解することは望ましいことである。

#### 【0007】

【課題を解決するための手段及び作用】本発明の態様の一つは、従来技術で受け入れられ信じられていたこと、――臨界縦横比は弾性率比の単調な関数であること――が正しくないという認識を含むものである。本発明のこの態様によれば、臨界縦横比（そして臨界長さ）は、弾性率比の関数であるとともに、本明細書中で「凝集エネルギー比」と称されている、繊維の凝集エネルギーとマトリクスの凝集エネルギーとの比の関数であることが判明した。そして任意の凝集エネルギー比に対して、臨界縦横比が最小もしくはそれに近い状態となるような弾性率比の特定の範囲が存在する。弾性率比と凝集エネルギー比の組合せを最小にするこのような臨界縦横比を持った材料は、最適な複合材料を提供する。臨界縦横比がこれら特定の複合体の集合においてより小さい値であるという概念は、多くの点で重要なことである。これら最適な繊維とマトリクスの組合せでの臨界縦横比は、他の繊維とマトリクスとの組合せでの臨界縦横比より小さい値となるので、臨界縦横比を越えないかぎり、より短い繊維を用いることが可能である。別の言い方をすれば、本発明のこの態様による繊維とマトリクスで形成される最適な複合体は、他の組合せより良好な、物理特性と加工性との間の均衡を与える。本発明のこの態様は、更に、これまで典型的に使用されてきた複合体はこれら好適な範囲の外にある、という認識を含むものである。

【0008】適切な凝集エネルギー比を有する複合体では、弾性率の好適な範囲は、約10～約20、好ましくは約13～約18、最も好ましくは約15である。本発明のこの態様はこれら好適な範囲内の弾性率比を有する複合体を提供する。好ましくは、本発明のこの態様による複合体は、ポリマーやポリマーの組合せの如き実質的に有機のマトリクス材料を含み、かつ、ポリマー繊維ないしガラスや炭素等の無機繊維を含むことができる。純粋な有機ポリマーや典型的な繊維の固有の物理特性では、通常、弾性率は上記の好適な範囲を外れたものとなる。このため、本発明のこの態様による好ましい複合体は、繊維又はマトリクス又はその両方の純粋な材料の固

有の物理特性とは異なるみかけの物理特性を付与すべく、繊維又はマトリクス又はその両方を変更する物理的手段を含む。

【0009】本発明の別の態様は、臨界縦横比を決定するために、複合体の改良された節点モデルを採用する。このモデルは、繊維を取囲むマトリクス内で伸長方向に伸びかつ有限な縦横比を持つ少なくとも1の繊維の中の複数の点を表わす複数の離間した概念的な節点を含む。この「概念的」という用語は、本モデルが現実の複合体ではなく、実際にはコンピュータに基づく数学的表現の如き複合体表現であることを示すために、本モデルの節点に関連して使用される。

【0010】また、本モデルは、繊維とマトリクスの機械的性質を、隣接した各概念的節点に対する各概念的節点の変位と、力もしくは好ましくはこれら隣接節点間の変形において貯えられたひずみエネルギーとの間の相関関係として表わす複数の関数を含む。つまり、これらの式は、各対の隣接節点の相対的変位と、これら節点間に作用する力、好ましくはひずみエネルギーとに関係する。一般に、このような関数は、その少なくとも一部が、各節点間に概念的に存在する、材料の機械的性質に基づいている。これらの関数は、該関数により予測される節点間の力又はひずみエネルギーが材料中のせん断応力を表わす成分を含むように選択される。特に好ましい構成においては、これら節点は三角形又はピラミッド状の格子に配置され、本モデルは、該格子中の最隣接の節点を相互結合させる概念的ボンド（bond）を含むことができる。これら関数は、このような各ボンドに沿った力ないしひずみエネルギーと該ボンドの長さとの間の関係を規定する式を含むことができる。最も好ましくは、これら関数は、ボンド間の角度の変化を表わす項をも含む。

【0011】本発明のこの態様による好ましい方法は、モデル中に少なくとも1つの変形を加えることにより該モデルを演算するステップを含み、該モデルが、この概念的荷重もしくは変形のもとで複合体が破壊することを示すようにする。好ましくは、この方法は、複合体の破壊が繊維の破壊又はマトリクスの破壊を含むかを決定し、次いで、異なった長さの繊維を表わすモデルを用いて、該モデルが、少なくとも第1の縦横比の繊維に対してマトリクス破壊を示しかつ少なくとも第2の縦横比の繊維に対して繊維破壊を示すまで、上記の如き演算を繰り返すステップを含む。以上のようにして本モデルは臨界縦横比を予測する。

【0012】好ましくは、本発明のこの態様による方法では、更に、本モデルの演算により得られた結果に少なくとも一部は基づいて、少なくとも1つの実際の繊維と少なくとも1つの実際のマトリクスを選択するステップを含む。繊維及びマトリクスは、実際の繊維及び実際のマトリクスが本モデルの関数により表わされた物理特性

と実質的に対応する物理特性を有するように選択されることが望ましい。好ましくは、実際の繊維は、少なくとも本モデルで予測した臨界縦横比よりも大きい縦横比を有する。また、この方法は、実際の繊維と実際のマトリクスを複合体に組み込むステップを含む。

【0013】本発明のこの態様による方法は、更に、連続演算において本モデルの物理特性を規定するモデル関数中の少なくとも1つのパラメータを変化させながら、モデルの演算を繰り返すステップを含んでもよく、この場合、本モデルは、上記連続演算で変化させた少なくとも1つのパラメータの異なった値を有する、繊維とマトリクスの複数の組み合わせに対する臨界縦横比を予測する。実際の繊維と実際のマトリクスを与えるステップは、それらの実際の機械的性質が本モデルの繰り返し演算中で使用した少なくとも一組の機械的性質に近似し、かつ繊維が少なくとも該一組の機械的性質に対して本モデルが予測した縦横比と少なくとも等しい縦横比を有するように、実際の繊維と実際のマトリクスを与えるステップを含むことが好ましい。最も好ましくは、本発明のこの態様による方法は、臨界縦横比が最小となる最適な機械的性質の組み合わせを、本モデルの様々な演算に使用した機械的性質の複数の組み合わせの中から選択するステップを含む。つまり、実際の複合体に使用する繊維とマトリクスのみかけの機械的性質は、臨界縦横比が本モデルで使用した少なくとも1つのパラメータに関して最小もしくはその近傍となるとモデルが予測した機械的性質を表わす。好ましくは、本モデルにおいて使用されるパラメータは、繊維及びマトリクスの弾性率比、即ちマトリクスの弾性率に対する繊維の弾性率の割合と、繊維とマトリクスの凝集エネルギーの比、即ちマトリクスの凝集エネルギーに対する繊維の凝集エネルギーの割合を含む。

【0014】本発明の更に別の態様は、ある解析式もまた繊維とマトリクスの物理特性の様々な組み合わせに対する臨界縦横比を予測するという認識を含むものである。従って、本発明のこの態様によるある方法は、繊維とマトリクスの物理特性の種々の組み合わせに対する臨界縦横比を計算し、最小もしくはその近傍の臨界縦横比を与える繊維とマトリクスの物理特性の組み合わせを選択し、さらに該選択された物理特性の組み合わせを有する繊維とマトリクスを含む複合体を提供するステップを含む。

【0015】本発明の更に別の態様は、各々固有の物理特性を有する繊維材料とマトリクス材料から形成された繊維とマトリクスを含む繊維強化複合体を提供する。繊維材料及びマトリクス材料の固有の物理特性は、固有の節点モデル臨界縦横比を規定することがわかる。つまり、前記モデルは、本明細書中で固有節点モデル臨界縦横比と称している、繊維及びマトリクスがこれらの材料の固有の物理特性と等しい物理特性を有する複合体の特

定の臨界縦横比を予測する。本発明のこの態様による複合体では、マトリクス材料と繊維の少なくとも一方が、そのみかけの弾性率又はみかけの凝集エネルギー又はその両方を変更する物理的手段を組み込み、その結果、繊維及び／又はマトリクスのみかけの物理特性はそれら材料自身の固有の物理特性とは異なったものとなる。繊維及びマトリクスのこのみかけの物理特性は、前述の固有臨界縦横比よりも小さい臨界縦横比を規定するものである。別の言い方をすれば、繊維及び／又はマトリクスのこのみかけの物理特性を節点モデルにおいて使用すると、得られる臨界縦横比—本明細書中ではみかけの節点モデル臨界縦横比と称される—は上記固有節点モデル臨界縦横比よりも小さくなる。更に、後で議論するように、繊維のみかけの物理的性質を変更するために使用される物理的手段は、シンプルでまっすぐで一般的な繊維形状からずれること及び／又は繊維自身の中に組み込まれる充填材を含むことができる。また、マトリクスの物理特性を変更するためにしようされる物理的手段は、充填材又はマトリクス中のボイドを含むことができる。繊維あるいはマトリクス中のこのような充填材あるいはボイドはマイクロスケール、即ち繊維あるいはマトリクスより小さい寸法であることが望ましい。このアプローチの変形例では、固有臨界縦横比及びみかけの臨界縦横比は前述の解析式で規定したものであってもよい。

【0016】本発明のこれらの態様による材料は、上述の最適な複合体の集合により接近するような特徴を含む。この点に関し、ある材料が本発明のこの態様によるものか否かは、節点モデルによるアプローチ又は解析式によるアプローチを用いて前述の固有臨界縦横比及びみかけの縦横臨界縦横比を決定することにより、判定することができるが、このような判定は材料自体を作製するために常に必要なものではない。

【0017】本発明のこれらの態様は、一方向不連続複合体、即ち複数の繊維が互いにほぼ平行に延びている複合体を含む様々な複合体に、有利性をもって利用することができる。本発明のこれらの態様は、ほぼ任意の繊維材料及びマトリクス材料から構成される複合体に適用することができるが、実質的に有機化合物からなるマトリクス材料、即ちマトリクスの主要部分が熱硬化性ポリマーや熱可塑性ポリマーのような有機材料からなるマトリクス材料を含む複合体の場合に特に有効である。好ましい繊維材料としては、ポリエーテル、ポリオレフィン、アラミドのような有機ポリマー材料、金属材料、或いはガラスやカーボンのような非金属無機材料が含まれる。

【0018】

【実施例】繊維強化複合体はマトリクス12中に多数の繊維10が分散している。これら繊維10の本体は長さL、半径dの細長いものである。複合体中のすべての繊維は、通常、少なくとも理論的には同じ長さLを有する。しかし、実際の複合体では、繊維の長さにはばらつ

きがある。従って、本明細書中において実際のマルチ繊維複合体中の繊維の長さと言う時は、複合体中の繊維の長さが最もとりうる値を言い、これは通常、繊維の長さのメジアン（中央値）である。同様に、複合体中の個々の繊維について使用する「直径」という用語は、繊維の長さ方向に垂直な方向における該繊維の外径の平均値を意味していると理解されるべきである。複合体において使用する繊維はしばしば実質的に円柱状であるが、この場合、ここで定義される直径は、単に円柱に関して通常理解されているような直径である。長さの場合と同様に、実際のマルチ繊維複合体中の繊維の直径は、該複合体中の種々の繊維が最もとりうる直径のことを言うとして理解されるべきである。図1の複合体の繊維10は実際縦横比（アスペクト比） $Sac1$ を有する。本明細書において使用されているように、実際の複合体中の繊維について縦横比 $Sac1$ とは、直径に対する長さの比であり、即ち $Sac1 = L/d$ である。

【0019】図1に示して複合体は「一方向」複合体、即ち多数の繊維が互いに略平行に伸びているものである。また、図1の複合体は「不連続」繊維複合体である。即ち、多数の繊維が有限の長さを有し、従って有限の縦横比を有する。典型的には、不連続繊維複合体中の個々の繊維の長さは、該繊維の長さ方向における全複合体の外寸よりもかなり小さい。

【0020】繊維10がマトリクス12に抗して複合体に加わる構造荷重を受ける程度は、マトリクス及び繊維の物理的性質により、また繊維の長さにより変化する。上述したように、マトリクスと繊維との任意の組み合わせにおいて、ある引張荷重が複合体に繊維の方向に加えられる時、繊維とマトリクスの両方が同時に破壊するような臨界長さ $L_c$ が存在する。この臨界長さ $L_c$ より小さい繊維長さでは最初にマトリクスが破壊し、臨界長さ $L_c$ より大きい繊維長さでは最初に繊維が破壊する。

【0021】複合体の破壊に関わる現象を、1本の繊維を持つ二つの複合体を表わす図2に模式的に示す。A、B、Cにおける複合体はマトリクス16に埋め込まれた繊維14を有し、該繊維14は該繊維と該マトリクスとの組み合わせに対する臨界長さより短い長さを有している。Aは無荷重の複合体を示し、Bは複合体の破壊荷重より小さい引張荷重のもとでの複合体を示す。繊維14の引張弾性率 $E_f$ がマトリクス16の引張弾性率 $E_m$ より大きくなると、繊維はマトリクスよりも剛くなる。従って、マトリクスは繊維よりも大きく変形する傾向を示す。別の言い方をすれば、マトリクスの変形は繊維とマトリクスとの間に伝わる力によりある程度制限される。繊維とマトリクスとの間に伝わるこの力は、繊維に張力を与える。この力はマトリクスの変形により、またマトリクスの比較的小さい弾性率により限定される。繊維の両端部では応力集中が生じる。この領域においてマトリクスと繊維との間に伝わる応力は極端に大きく、その結

果、繊維の各端部に局部的なマトリクス破壊ゾーンができる。複合体に加わる荷重が次第に増加するにつれて、マトリクスと繊維との間に伝わる力は増加し、繊維の両端に集中する応力も増加する。繊維に伝わる力、即ち繊維内の引張応力は、複合体に加わる荷重が増加しかつマトリクスが変形するにつれ、ほんのわずかなだけ増加する。従って、繊維の両端に隣接するマトリクスの領域18において集中した負荷は破断レベルに達し、マトリクスは繊維14が破壊する前に20で示すように壊滅的破壊を起こす。

【0022】下方のD、E、Fは同様なマトリクス16'及び繊維14'を示すが、繊維14'は繊維14よりかなり長くなっている。加える荷重を次第に大きくすると同様な現象が起こる。そして集中した荷重が繊維14'の両端のマトリクスの領域18'に加わり、繊維14'はマトリクスから伝わる荷重によって引張状態に置かれる。しかし、繊維14'は比較的に長いので、繊維に加わる引張荷重はマトリクスに集中する荷重に比べ比較的大きく、その結果、繊維14'はマトリクスが領域18(Fに図示)において発生する壊滅的破壊の前にその破壊荷重に達する。

【0023】「臨界長さ」という用語は特別な繊維長さ $L_c$ を意味し、 $L_c$ より短い長さ $L$ の繊維はマトリクスが破壊するふるまい(Cに図示)を示し、 $L_c$ より長い長さ $L$ の繊維は繊維が破壊するふるまい(Fに図示)を示す。同様に臨界縦横比 $Sc$ より小さい縦横比 $Sac1$ を持つ繊維ではマトリクスの破壊だけが優位に起こり、臨界縦横比 $Sc$ より大きい縦横比 $Sac1$ を持つ繊維では繊維の破壊が優位に起こる。

【0024】本発明の一態様は、繊維とマトリクスの様々な組み合わせでの臨界縦横比 $Sc$ を予測する新しい解析式及び繊維とマトリクスの性質が変わった時の臨界縦横比 $Sc$ のふるまいを予測する新しい解析式を見出したことにある。これらの解析式の数学的導出を十分に議論することは、この新しく見出した諸関係式を応用するためには必要ではない。しかしながら、これら諸関係式を導くときに用いた一般的な手段は理解されるべきものである。近接して配された複数の繊維を有するマルチ繊維複合体における真の応力分布は非常に複雑であるので単純な数学的技法によっては処理することができない。従って、新しい関係式は、「希薄(dilute)」複合物、即ち各繊維のまわりの応力分布は隣の繊維の近傍で起っている効果の影響を受けない複合物、という単純化された仮定を用いて導出される。このような希薄複合物中の各繊維は、あたかもそれを取囲む半径 $R$ の円柱状のマトリクス領域中に唯一つの繊維が存在しているようにふるまう。ここで $R$ はファイバーの中心軸からの距離で、ファイバーの中心軸ではマトリクス中の応力が当該複合物の平均引張ひずみと等しくなる。後述するように、 $R$ は材料の性質に依存する。又、これらの関係式を



導出するに当り、端部接着はないとの仮定、即ち繊維の端部と該端部を覆っているマトリクス表面との間に引張応力は伝わらないとの仮定がなされる。更に、繊維とマトリクスは弾性を維持すること、繊維とマトリクスの間の境界は無限に薄いこと、及び、この境界においてひずみの不連続性はないことが仮定される。つまり、繊維の表面はそれに対面するマトリクス表面に対して滑らず、むしろ繊維表面の端部がそれと直に対面するマトリクス表面部分と同じ程度移動すると仮定する。

【0025】この解析は、繊維の長手方向に沿った座標  $x$  とこの繊維の長手方向に垂直な、即ち座標  $x$  に垂直な2つの座標をもつ3次元座標系、または繊維の長手方向に沿った座標  $x$  と繊維を横切る方向の1つのみの座標を

$$\sigma_f(x) = \frac{E_f}{E_m} \sigma_m \left[ 1 - \frac{\cosh \beta (x-L/2) / r_f}{\cosh \beta L / 2 r_f} \right] \quad (I)$$

ただし、

$$\beta = \sqrt{\frac{E_m}{2 E_f (1 + \nu_m) (R / r_f - 1)}} \quad (II)$$

である。また、上記式中、 $\nu_m$ はマトリクスのポアソン比、 $E_m$ はマトリクスの弾性率、 $E_f$ は繊維の弾性率、 $r_f$ は繊維は半径、 $R$ は上述した距離をそれぞれ表す。

【0026】同様な考え方で、繊維の長さ方向における

$$\tau_i(x) = \beta \frac{E_f}{E_m} \sigma_m \left[ \frac{\sinh \beta (x-L/2) / r_f}{\cosh \beta L / 2 r_f} \right] \quad (III)$$

ここで、とりうる一つの仮定は、臨界長さ  $L_c$  にちょうど等しい長さの繊維では、繊維の midpoint で起こる引張破壊はマトリクスの引張破壊と同時に起こるということである。

【0027】つまり、マトリクスと繊維の両方が各破壊応力とちょうど等しい応力を受ける。即ち、繊維の応力を  $\sigma_f$ 、繊維の破壊応力を  $\sigma_f^*$ 、マトリクスの応力を  $\sigma_m$ 、マトリクスの破壊応力を  $\sigma_m^*$  とすると、この場合、

$$\sigma_f^* = \sqrt{2 E_f U_f}$$

同様に、

$$\sigma_m^* = \sqrt{2 E_m U_m}$$

上記において  $U_m$  はマトリクスの凝集エネルギーである。ここで無次元の比  $E$  を  $E_f / E_m$  と定義し、同様に無次元の比  $U$  を  $U_f / U_m$  と定義する。これらの式ならびに

$$S_c = \frac{1}{\beta} \cosh^{-1} \left[ \frac{E}{E - \sqrt{UE}} \right]$$

上記において  $S_c$  は臨界縦横比である。

【0028】関係式 VI は、純粋な引張破壊はマトリクス中で起こるという仮定に基づいている。他の起こりうる破壊のメカニズムは、繊維の両端に隣接した繊維-マトリクス境界ではせん断応力による破壊が優勢となることである。つまり、繊維中の最大応力が繊維の破壊応力

$$\tau_i(x=0) = \tau_i^* = \beta \left[ \frac{\sinh \beta S_c}{\cosh \beta S_c - 1} \right] \sigma_f^* \quad (VII)$$

上記において  $\tau_i$  はマトリクスの破壊せん断応力であ

もつ2次元座標系で行われる。2次元座標系による解析では、繊維とマトリクスは繊維長さのまわりに対称になっているという固有の仮定を取り入れる。この仮定はほとんどのケースにおいて現実的なものである。以下の解析式及び方程式では2次元座標系を用いる。繊維の長さに沿った座標  $x$  は繊維の一端を始点とする。即ち、繊維の一端では  $x=0$ 、他端では  $x=L$  ( $L$  は繊維の長さ) となる。これらの仮定と、応力解析に適用される通常の平衡条件 (系のある部分に作用するすべての力のベクトル和は零である) とにより、繊維の長さ方向における任意の点  $x$  での繊維の引張応力  $\sigma_f$  とマトリクスの引張応力  $\sigma_m$  との関係は以下になる。

【数1】

【数2】

任意の点  $x$  でのマトリクス-繊維境界に存在するせん断応力  $\tau_i$  と、マトリクス中の引張応力との関係は次のようになる。

【数3】

$\sigma_f = \sigma_f^*$ 、 $\sigma_m = \sigma_m^*$  となる。繊維とマトリクスの各破壊応力は、これらの弾性率及び凝集エネルギーに関係する。「調和」仮定、即ち繊維がフックの法則に従うとの仮定を用いると、繊維の凝集エネルギー  $U_f$  は単純に

$(\sigma_f^*)^2 / 2 E_f$  となる。この式は次のように書換えられる。

【数4】

(IV)

【数5】

(V)

定義を上記式 (I) へ代入すると直ちに次式が得られる。

【数6】

(VI)

に達したとき、繊維の一端 ( $x=0$ ) でのせん断応力  $\tau_i$  はマトリクスの破壊せん断応力  $\tau_i^*$  に達するという事である。これらの仮定と式 I 及び式 III から次式が得られる。

【数7】

る。しかしこのマトリクスの破壊せん断応力は、マトリ

13

クスの破壊引張応力と同様、マトリクスの凝集エネルギーに関係する。再び調和仮定ないしフックの法則の仮定

$$r_i = \sqrt{2 G_m U_m}$$

この式VIIIと、繊維の破壊引張応力と凝集エネルギーとの関係を示す上記式IVを用いると次式が得られる。

$$Sc = \frac{1}{\beta} c o s . h^{-1} \left[ \frac{c+1}{c-1} \right]$$

ここで

$$C = \frac{(R/r_f - 1)}{U} \neq 1$$

である。

【0029】このように、式VIと式IXは破壊のメカニズムに関する異なった仮定に基づいている。このように図3は、 $U=2$ である複合体について、 $E$ が示されている範囲にわたって変化するとき、上記2つの式から予測される臨界縦横比 $Sc$ を示している。明らかに、可能性のある2つの破壊のメカニズムは異なった値の臨界縦横比 $Sc$ を導いている。 $E$ での任意の値においてより大きい臨界縦横比の値を与える関係式（つまり $E$ のある値においてより高い値の曲線）が、解析的に導出された臨界長さを定義するのに採用される。別の言い方をすれば、 $E$ の比較的低い値においてある $U$ の値に対し、臨界長さは、マトリクスが引張で破壊する前に繊維が破壊荷重に達することを確実にするために必要な繊維の最小長さであり、一方、 $E$ の大きい値においては、臨界長さは、マトリクスが繊維の両端部でせん断により破壊する前に繊維が破壊荷重に達することを確実にするために必要な繊維の最小長さである。

【0030】本明細書中において用いられる「解析的臨界縦横比」という用語は、ある物性の組合せ（ $E_m$ 、 $E_f$ 、 $U_m$ 、ポアソン比 $V_m$ ）に対し $Sc$ 、 $ana$ と表示され、式VIと式IXのいずれか大きい値を与える式に従って決定される臨界縦横比 $Sc$ のことを言うとして理解されるべきである。 $Sc$ 、任意の $U$ に対して、 $ana$ は $E$ の特定値において最小値を持つ。ここで最小値を与える $E$ の値を $E_{mins}$ と表わす。

【0031】式IXと式VIの両式から得られる結果は、パラメータ $R$ にあてがわれる値に一部依存する。この値は、これらの式に使用されている他のパラメータの計算に使用される。 $E_{mins}$ 以下の $E$ の小さい値（典型的には、式VIの値が式IXより高い値を与える場合）では、 $R$ は定数 $R_0$ として扱われる。 $E_{mins}$ より大きい $E$ の値では、 $R$ は $E$ にほぼ比例する。従って、 $R$ は $R_1 E$ （ $R_1$ は定数）として扱われる。定数 $R_0$ と $R_1$ の値は直接導き出すことができず、 $U$ とともに変化する。 $U$ のある値に対して、定数 $R_0$ と $R_1$ の値は、実験から決定される臨界長さの2つの値から、又は後に詳述する節点モデルに従って決定される臨界長さの2つの値から決定することができる。このような2個の値の任意の組に対し

14

を適用すると、次式が得られる。

【数8】

(VIII)

【数9】

(IX)

【数10】

(X)

て、一方は $E_{mins}$ より小さい $E$ を表わし、他方は $E_{mins}$ より小さい $E$ を表わす。 $R_0$ 及び $R_1$ は、決定された臨界長さと、 $E$ 及び $U$ の既知の値を上述の式に代入することによって得ることができる。一例を述べると、後述の節点モデルを用いて求めた場合、 $U=2$ に対し、 $R_0$ は約12、 $R_1$ は約0.57となる。 $R_0$ 及び $R_1$ が $E$ の2つの値に対して節点モデルを用いて決定される場合、 $U$ の同じ値において $E$ の他の値に対して上述の式に従って決定される $Sc$ 、 $ana$ は、これら $E$ の他の値に対する節点モデルの臨界縦横比と実質的に等しくなる。別の言い方をすれば、一旦、解析式を2点において節点モデルで較正すると、別の点においても実質的に同じ結果を生じさせる。このように、上述の解析式は節点モデル臨界縦横比を計算するために用いることができる。

【0032】本発明の別の態様によれば、複合体の臨界縦横比は節点モデルによって決定することができる。ここで言う節点モデルとは、物理的構造モデル又はアナログコンピュータ好ましくはデジタルコンピュータで実施しうるより好ましい数学的モデルのことである。本発明のこの態様に従った1モデルの仮定幾何形状を図4に模式的に示す。このモデルは複数個のボンド32で相互に結合された複数個の節点30を含む。節点30とボンド32は概念的なものである。即ち、これらは、物理的な形式として存在する必要はないが、モデル中で用いられている表現形式としてのみ存在する必要のある特徴である。節点30aはマトリクス内の点を示し、節点30bは繊維内の点を示す。ボンド32は、節点30間の相互結合を、節点で合わされる点の相対的変位と、これらの点間の直線の長さに沿って作用する力との間の関係として表わしている。従って、各節点とその最隣接節点との間のボンドは、繊維とマトリクスの機械的性質を、各隣接節点に対する各節点の変位とこれらの節点間に作用する力との相互関係として表わしている。特に図4に示した形態では、繊維は単位径をもった1つのボディとしてモデル化されている。即ち、一列の節点のみが繊維を表わし、残りの節点はマトリクスを表わしている。また、図4に特定したモデルは2次元モデルである。このように、実際の繊維は3次元体であるが、数学的モデルでは、単一の節点層により2次元モデルで表わされる。



別の言い方をすれば、数学的モデルは図4の面の上下にある接点を含んでいない。

【0033】このモデルは、ボンド32は、該ボンドの長手軸に沿って存在する特定物質の引張弾性率に比例するばね定数を有するテンション・スプリングとして扱われる。そして、マトリクス内で節点30aどうしを結合する、又はマトリクスの節点30aと繊維の節点30bを結合する各ボンド32aは、マトリクスの弾性率に比例するばね定数を有するスプリングとして扱われ、繊維の一節点30bから繊維の別の節点30bに伸びるボンド32bは、繊維の弾性率に比例するばね定数を有するスプリングとして扱われる。別の言い方をすれば、各ボンド32aに沿った方向の力は $E_m(r-r_0)$ と等しいとされる。ここで $r$ は問題にしている条件下でのボンドの長さを表わし、 $r_0$ は出発条件又は零ひずみ条件でのボンドの長さを表わす。同様に、任意のボンド32bに対して、このボンドに沿った力は $E_f(r-r_0)$ に等しいとされる。

【0034】更に、マトリクス材料のせん断抵抗を表わすために、本モデルではねじり成分もしくは「三体」成分を含む。このねじり成分は交わる各対のボンドどうしを結合するトーション・スプリングを表わすものとして考えることができる。このような各トーション・スプリングの変形は、交わる各対のボンドどうしの間の角度 $\theta$ の変化に比例するものとし、トーション・スプリングの

$$H = \frac{1}{2} E_a \sum_{ij} (r_{ij} - r_0)^2 + \frac{1}{2} c \sum_{ijk} (\cos \theta_{ijk} - \cos \theta_0)^2$$

(XI)

ここで $i, j$ は種々のボンドのすべてを指定し、 $i, j, k$ はすべての角度を指定し、 $r$ はボンドの長さ又は隣接する任意の対の接点 $i$ と $j$ 間の距離を表わし、 $E_a$ はマトリクスのボンド32aを指定する $i, j$ に対しては $E_m$ であり、繊維のボンド32aを指定する $i, j$ に対しては $E_f$ であり、 $r_0$ は種々のボンドの出発長さを表わし、これらのすべては等しいと仮定される。 $\theta_{ijk}$ は

$$h_{bond} = \frac{1}{2} E_a (r - r_0)^2 + \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{2} c \sum_{ijk=neighbors} (\cos \theta_{ijk} - \cos \theta_0)^2 \right]$$

(XII)

ここで $h_{bond}$ は問題としている特定ボンドのエネルギーである。“ $ijk=neighbors$ ”という表現は、問題としているボンドに対する隣接ボンドのなす角度 $\theta$ 、即ち問題としているボンドと他のボンドとの間の角度にわたって総和をとることを示している。例えば、図4のボンド32a<sub>1</sub>に関して、総和は $\theta_A, \theta_B, \theta_C$ 及び $\theta_D$ の項を含んでいる。このような隣接角に関連するエネルギーの1/2のみが前述の式中で問題とされるボンドに寄与する。このように、特定のボンドのエネルギー $h_{bond}$ は、当該ボンドの伸張に関連する全エネルギーと各隣接角の変形に関連するエネルギーの1/2を含むものとして扱

ばね定数はマトリクス材料の弾性率 $E_m$ の1/7であると仮定する。つまり、せん断抵抗はマトリクス材料のせん断性のみ関係し、更に、マトリクス材料は0.1のポアソン比を有すると仮定される。この点に関して言えば、高分子マトリクスは、一般にポアソン比 $\nu_m$ が0.3であり、実際のガラス繊維のポアソン比 $\nu_f$ は通常0.2である。しかし、本モデルは繊維を表わすのに一列の節点群しか使用していないので、 $\nu_f$ は0であることが仮定される。従って、 $\nu_m$ が0.3であると仮定することは、実際の関係式 $\nu_m - \nu_f = 0.1$ ということの意味する。ねじりは交わる各対のボンドについて $c(\theta - \theta_0)$ で与えられる。ここで、 $\theta$ は交差するボンドの間の角度を表わし、 $\theta_0$ は同じボンド間のひずみ条件の角度を表わし、 $c = E_m/10$ である。各ボンド32はこのような幾つかの交差の一部をなし、従って、このような概念的なトーション・スプリングの一部をなす。そしてボンド32a<sub>1</sub>は $\theta_A, \theta_B, \theta_C, \theta_D$ の4つの角度を形成する。このような概念的な各角度 $\theta$ は3つの節点の位置の関数であることから「三体」項となる。例えば、図の $\theta_A$ は、節点30a<sub>1</sub>、30b<sub>1</sub>及び30b<sub>2</sub>の位置の関数である。

【0035】この径の全ひずみエネルギーは次式によって与えられる。

【数11】

前述の角度のいずれか1つを表わし、 $\theta_0$ はその角度の出発値で $60^\circ$ と仮定される； $c$ は前述のトーション・スプリングのばね定数で $E_m/10$ である。

【0036】本モデルにおいて任意の個々のボンドに係るエネルギーは次式で表わされる。

【数12】

40 われる。

【0037】本モデルは図5に示された一般的スキームに従って操作される。本モデルの任意の特定のランにおいて評価された繊維長さは、繊維の一部又はマトリクスの一部として、特定の節点の特徴を暗に示す。例えば、本モデルは、節点30b<sub>1</sub>が繊維中よりもむしろマトリクス中に含まれると仮定し、かつこれと対応して、関連するボンドのいくつかの特徴を調整することにより、より短い繊維をシミュレーションするように作ることができる。マトリクス及び繊維材料の性質は、 $E_m$ と $E_f$ の仮定値において、また同じく仮定される繊維とマトリクス

の凝集エネルギー $U_f$ 及び $U_m$ の中に反映される。これらの仮定により、本モデルは、図5に示した操作のサイクルを実行する。演算スタート時に、モデル構造がある任意に選択した量だけ変形すると仮定する。図4を用いて説明すると、これは、節点 $30a_1$ 、 $30a_2$ 及び $30a_3$ はそのまま、節点 $30_1$ 、 $30a_1$ 及び $30_2$ は $x$ の方向もしくは繊維軸方向に沿って、上記任意に選択された変形量に相当する量だけ右方へ変位するとの仮定に相当する。

【0038】次の演算ステップでは、他のすべて節点の位置が、式XIに従って、全ひずみエネルギー $H$ が最小となるように選択される。つまり、上記で仮定した変形、即ち上記で仮定された節点位置 $30a_1$ 、 $-30a_2$ 及び $30_1$ 、 $-30_2$ と一致する $x$ 、 $y$ 方向（直交軸）におけるすべてのとりうる節点位置 $r$ の組からなる集合より、 $H$ が最小となる節点位置の特定の組合せが求められる。

【0039】本モデル中のボンドと角度の値 $r$ 及び $\theta$ は節点位置の各組合せに対して一義的に決定される。従って、 $x$ 、 $y$ 方向におけるとりうる節点の各組合せに対して $H$ の値が式XIIに基づき計算することができる。別の言い方をすれば、 $H$ は、独立変数を特定するすべての位置の関数、即ちすべての節点の $x$ 、 $y$ 位置の値の関数である変数である。このように、 $H$ の最小値を与える $x$ 、 $y$ 値を選択する問題は、単にこれらの独立変数の関数の最小値に関連する独立多変数の値を求める問題である。独立多変数の関数の最小値を求めるための数学的技法及び該最小値に関連する

独立変数の値を求める数学的技法はよく知られている。これらは「最小化」技法と称されている。このような技法の任意のものを使用することができる。一般的に、これらの技法は、反復もしくは試行錯誤、即ち最小値を生じる特定の組合せがみつかるまで、様々な独立変数の組合せに対し試行を行うことを含む。試行されるべき組合せは、多くの公知の数学的アルゴリズムのいずれかに従って選択される。好ましい最小値発見アルゴリズムは、プレス (Press) 他著のテキストである「数値処方、科学計算技法 (Numerical Recipes, The Art of Scientific Computing)」ケンブリッジ大学発行、1986、特にこのテキスト中の関数の最小化、最大化に関する第10章に開示されている。この章で開示された内容を以下に参照する。

【0040】最小化法は、複数の独立変数によって定義される多次元空間において扱われ、かつ、一連のライン最小化 (Line minimizations) を実行することにより、即ち該多次元空間内で特定の直線を選択し、その直線に沿って少なくとも局所的な最小値がみつかるまで移動させることにより処理される。いわゆるグラジエント法は、関数のグラジエント、即ち多次元空間における関数の一階偏微分係数からなるベクトルを、これらライン最小化で用いられる種々の直線の方法を選択するガイドと

して用いる。いわゆる最小降下法 (steepest descent method) は、ある任意の方向でライン最小化を行い、次いで、更に別の最小値をみつけるべくその局所的最小値の所での勾配の方向の直線に沿って更にライン最小化を行い、このプロセスを何回も繰返すものである。このようなアルゴリズムは、最終的には、真の大域的な最小値に収れんするが、かなり速度が遅いので、一般的にはあまり好ましい方法ではない。より好ましい最小化技法は共役勾配法 (conjugate gradient method) と称されているものである。この共役勾配法では、逐次ライン最小化が、後に続く方向が共役となるように選択された一連の方向に沿って実行される。つまり、そのようなある一つの方向のベクトルと“ヘシアン” (“Hessian”) 行列と称されるある特定の行列との積は、次に続くベクトルと乗じたときに零となるベクトルを生成し、かつ、そのような各方向ベクトルは直前のベクトル方向の直線に沿って局所的最小点を通過する。共役勾配法による最小化を行う特定のアルゴリズムはよく知られており、前述のテキストの特に第305～306頁に記載されている。

【0041】全体として、あるモデルでひずみエネルギー $H$ の最小値を生成する特定の節点位置を選択したら、次のステップで、上記式XIIに従ってボンドに関連するひずみエネルギーを計算する。計算された各ボンドのエネルギー $h_{bond}$ は、次いで特定のボンドの適切な凝集エネルギーに対して個別にテストされる。各マトリクスのボンド $32a$ の結合エネルギーはマトリクスの凝集エネルギー $U_m$ と比較され、繊維ボンドのひずみエネルギーは繊維の凝集エネルギー $U_f$ と比較される。ある特定のボンドに関連するひずみエネルギーがそのボンドに関連する凝集エネルギーを越えた場合、その特定のボンドは破壊したとみなされる。

【0042】このステップの手順は、本モデルの重要な特徴に関係している。全ひずみエネルギーの式、特に特定のボンドに関連するひずみエネルギーの式は引張応力及びせん断応力を示す項を含むので、本モデルは引張効果とせん断効果が組み合った結果として発生する組合破壊を反映している。もし、ボンドが本モデル演算のこの段階で破壊することが判明したならば、本モデルを定義する式は破壊されたボンドを考慮して調整される。つまり、後続する計算において、破壊されたボンドは引張弾性率が0、せん断弾性率が0であると仮定され、その結果、後続する計算において、破壊されたボンドの $E_a$ と隣接角 $c$ がそれぞれ0であると仮定される。別の言い方をすれば、本モデルの構造は破壊されたボンドを考慮して再調整される。このような調整の後、本モデルは全エネルギー $H$ の最小値を与える節点の特定位置を計算するステップに戻る。これらの新しい位置は、通常、全ひずみエネルギーの最小値をすべての破壊されていないボンドに与える位置とは異なることがわかる。

【0043】最小値を再計算した後、個々のボンドのエネルギーが新しい節点位置に対し再び計算され、次いでUの適正值に対して再びテストされ、別の破壊されたボンドがチェックされる。もし更に破壊されたボンドがみつかった場合、上述の節点変位の計算がそれ以上破壊されたボンドを生成しなくなるまで、上記プロセスを繰返す。(最小ひずみエネルギーの最初の計算もしくはモデルの式を再調整した後の計算のいずれかにおいて)この条件に達すると、その結果をチェックし、壊滅的破壊が起っているかどうか、即ち、破壊されたボンドの列がマトリクスを完全に横切って延びているかどうか判定する。この判定結果が否であれば、最初に仮定した変形量を増加させ、上述のステップを再び繰返す。

【0044】この演算サイクルは、本モデルが壊滅的破壊を起こしていることを示すまで繰返される。この時点で本モデルは、破壊されたボンドのアイデンティティーから破壊のモード、即ち、破壊がマトリクスだけに起っているか或いはマトリクスと繊維の双方に起っているかを判定する。最初の壊滅的破壊をシミュレートした後、本モデルでは、繊維長さを予め決められた分量だけ増加または減少させる。この予め決められた分量は繊維長さの一定量もしくは一定比率とすることができる。用いた最後の繊維長さで観測された壊滅的破壊がマトリクスだけに起っているならば、本モデルで繊維長さを増加させる。繊維破壊が観測されたならば、本モデルで繊維長さを減少させる。繊維長さを増減させた後、本モデルでは、新たな繊維長さでの別の壊滅的破壊をシミュレートすべく、上述した演算を繰返す。このサイクルは、少なくとも1つの繊維のみの破壊と少なくとも1つのマトリクスのみの破壊がシミュレートされるまで続けられる。臨界長さ、或いはマトリクスのみの破壊と繊維の破壊との境界値は、マトリクスのみの破壊を与える最大の繊維長さとして繊維破壊を与える最小繊維長さの中間の値とする。節点モデルの臨界縦横比は、この臨界長さを繊維の仮定直径で割算したものに等しい。図4の特定モデルのように繊維の直径を1と仮定すると、臨界縦横比は臨界長さに等しくなる。従って、 $E_f$ 、 $E_m$ 、 $U_f$ 及び $U_m$ の任意の値に対して本モデルは臨界縦横比を決定する。

【0045】本明細書で用いられている「節点モデル臨界縦横比( $Sc_{nm}$ と表記)」という用語は、上記モデルを用いた方法で決定される臨界縦横比を意味する。より詳しくは、節点モデル臨界縦横比 $Sc_{nm}$ は、弾性率E( $E = E_f / E_m$ )と凝集エネルギーU( $U = U_f / U_m$ )との関数である。このように、繊維とマトリクスの弾性率及び凝集エネルギー、より詳しくはこれらのパラメータの比が節点モデル臨界縦横比を決める。

【0046】節点モデル臨界縦横比は、U及びEに対して、上述の解析的臨界縦横比と実質的に同じ変化のパターンを示す。つまり、Uの任意の値に対して、臨界長さが最小となるような弾性率Eの特定範囲が存在する。解

析的臨界縦横比と節点モデル臨界縦横比の両方の変化のパターンをUの幾つかの値につき図6に示す。図6において、 $Sc$ は節点臨界縦横比 $Sc_{nm}$ を表わしている。上述のように、解析的臨界縦横比 $Sc_{ana}$ の計算に使用した $R_o$ と $R_i$ の値が節点モデルに対して較正された場合、 $Sc_{ana}$ の値は、同じUとEの値に対する節点モデル臨界縦横比に対して与えられる値と実質的に同じになる。

【0047】上述した節点モデル及び解析的手法で判明した臨界縦横比のU及びEへの依存性は、いくつかの非常に重要な結果を提供し、それらは本発明においても活用される。Eが変化するときの解析的臨界縦横比のふるまいは重要である。 $Sc_{ana}$ と $Sc_{nm}$ の値にははっきりとした最小値が存在する。 $Sc_{ana}$ と $Sc_{nm}$ の実際の値はUの異なる値に対して異なるが、Uの適切な値(約1~約5)に対する $Sc_{ana}$ と $Sc_{nm}$ の両方の最小値は、約10~約20、通常は約13~約18のEの範囲内にある。別の言い方をすれば、上述した関係により、凝集エネルギーのとりうる比を持つ物質では、最小の臨界縦横比を与えるために、繊維及びマトリクスは、約10~約20、好ましくは約13~約18、更に好ましくは約15の $E_f / E_m$ 値を持つのが望ましいことが示される。

【0048】 $Sc_{nm}$ と $Sc_{ana}$ の決定で用いられる繊維の引張弾性率( $E_f$ )とマトリクスの引張弾性率( $E_m$ )の値は既知の物性データ集に報告されている標準的物性値から選び出して用いることができる。同様に、繊維の凝集エネルギー $U_f$ の値も、その繊維の試験に基づいて得られた、複合体に通常用いられている直径を持つ該繊維のデータから取り出して用いることができる。このデータは一般に入手可能である。凝集エネルギーのデータが繊維の試験から得られる場合は、典型的な繊維の欠陥は非常に低いので、元々のデータはサンプル中の欠陥のような外的要因によって実質的に影響を受けることはない。特に、ガラス繊維は元々欠陥率がかなり小さく、良好に実施された繊維の破損テストから得たガラス繊維の凝集エネルギーのデータは通常、繊維の真の凝集エネルギーを反映する。しかし、材料についてエンジニアリング用物性データのテストで通常用いられるような嵩の大きいマトリクス材料のサンプルでは、かなりの数の欠陥が含まれる。このようなサンプルの試験から得られた凝集エネルギーの値は、実質的に欠陥を有しないサンプルの試験で得た凝集エネルギーの値よりも、はるかに小さい値となる。もし欠陥が反映した $U_m$ の値を実質的に欠陥がない $U_f$ の値とともに使用すると、Uの合成値は繊維とマトリクスの凝集エネルギーの真の比を反映しないものとなる。

【0049】「真の」或いは欠陥の影響がない $U_m$ の値は、繊維の寸法と同様な寸法を持つマトリクス材料のマイクروسケール・サンプルを作り、このサンプルをテストすることにより得ることができる。

【0050】繊維材料とマトリクス材料の任意の組合せ

に対する凝集エネルギーの比の真の値、そしてマトリクス材料の $U_m$ の真の値は、問題となるマトリクス材料の既知の $U_f$ を持つ繊維材料に組み込んでなる単繊維希薄複合体の物理テストを行うことにより得られる。この物理テストは該マトリクス材料と既知の繊維材料を含む系の臨界縦横比を決定する。臨界縦横比は、 $E_f$ と $U_m$ の既知の値及び $E$ と $U$ の様々な組合せに対する $Sc_{nm}$ の値とともに、適正な $U$ の値を決定するために使用することができる。また、この値は、マトリクス材料の $U_m$ の値を決定するために $U_f$ の既知の値とともに使用することができる。

【0051】例えば、炭素繊維は $E_f$ の値が250 GPa、 $U_f$ の値が0.0405 GPaであり、純粋なエポキシ樹脂のマトリクス材料は $E_m$ の値が2.7 GPaである。従って、エポキシマトリクス／炭素繊維の系の $E$ の値は250/2.7、つまり約92.6である。物理テストはこの系の $Sc$ は約62であることを示す。図6

ガラス繊維及び炭素繊維と、典型的な熱可塑性ポリマー及び熱硬化性ポリマーを使用した複合体の繊維／ポリマーの弾性率

	E (=Ef/Em)		
	Em(GPa)	ガラス(Ef=75GPa)	炭素(Ef=250GPa)
熱可塑性ポリマー			
PMMA	2.7	28	92
ポリカーボネート	2.3	33	106
ポリスチレン	2.7	28	92
熱硬化性ポリマー			
ポリエステル	2.0	38	125
ビニルエステル	2.4	31	104
エポキシ	2.7	28	92

【0054】例えば、炭素繊維( $E_f=250$  GPa、 $U_f=0.091$  GPa)をエポキシのマトリクス( $E_m=2.7$  GPa、 $U_m=0.027$  GPa)に含む複合体の接点モード臨界縦横比は約62である。しかし、図6に見られるように、 $E$ 及び/又は $U$ の別の値を持つ理論的な複合体は、より小さい臨界縦横比を持つ。 $U=1.5$ の系では $Sc$ の最小値は約11~12であり、これはおよそ $E=10$ から $E=15$ の間で発生している。別の言い方をすれば、このエポキシマトリクス／炭素繊維の系は臨界縦横比に関しては最適なものではない。同様な純粋エポキシ樹脂マトリクスと $E_f=250$  GPa、 $U_f=0.091$  GPaを持つガラス繊維との複合体の場合、 $E$ が約28、 $U$ が約3.3となる。このとき臨界縦横比は約82である。しかし、 $U=3.3$ の複合体の $Sc_{nm}$ の最小値は50より小さく、これは $E$ は約11から15で生じる。他のポリマーマトリクスを用いた他の同様な複合体の臨界縦横比も、同様に、この得られる $Sc_{nm}$ の最小値とはるかにかけ離れたものとなる。

【0055】本発明の更に別の態様によれば、複合体に、繊維又はマトリクス又はその両方の性質を変更する物理的手段を含ませ、繊維又はマトリクス又はその両方

の曲線で示したデータとともにこれらの値を用いると、この系の凝集エネルギー比 $U$ は約1.5であることが示される。つまり、 $E$ の値が約92.6で $Sc$ の値が約62である系は $U=1.5$ の曲線上にある。従って、 $1.5=U_{carbon\ fibers}/U_{epoxy\ matrix}$ となる。 $U_{carbon\ fibers}$ の既知の値を代入すると、 $U_{epoxy\ matrix}=0.027$  GPaとなる。この $U_m$ の値は、炭素繊維もしくは他の繊維と関連して上述した解析式又は節点モデルを用いて $Sc$ を決定するために用いることができる。

【0052】また、前述の結果は複合体を変更するためのガイドを提供する。表1に示されるように、ガラス繊維もしくは炭素繊維のような繊維を高分子マトリクスに組み込んでなる、本発明以前に用いられた典型的な複合体は、大きな臨界縦横比を与える固有の性質を持つ。

【0053】

【表1】

30 が、純粋なソリッド繊維材料或いは純粋なソリッドマトリクス材料の固有な性質と明らかに異なった性質を示すようにすることができる。この変更は、繊維とマトリクスのみかけの性質によって決められる臨界縦横比が繊維材料とマトリクス材料自体の固有な性質によって決められる臨界縦横比より小さくなるように選択される。別の言い方をすれば、繊維もしくはマトリクスに組み込まれる物理的手段は、これらの材料があたかも純粋なソリッド材料の性質と異なった物理特性をもつように、これらの物質の作用の仕方を変える。これらの異なった物理特性はより小さい臨界縦横比を生じさせる。この目的を達成するために用いることのできる種々の物理的手段を組み込んだ仮想的複合体が図7に示されている。1本の繊維40は固有の引張弾性率 $E_{f,ini}$ を持つ繊維材料から形成されている。繊維40は中空で内孔42を有している。繊維40は、同じ材料のソリッド繊維より小さいばね定数を有している。そして、繊維40は、より小さい値の $E_f$ を持つ材料から形成されたソリッド繊維と同様に作用する。このより小さい $E_f$ の値一繊維40と同じ外径 $d$ 及び同じ引張ばね定数を持つソリッドな円筒状繊維を提供するために必要な $E_f$ の値を、ここでは繊維40の

みかけの弾性率  $E_{f,app}$  と表わす。他の言い方をすれば、繊維 4 0 はあたかもみかけの弾性率  $E_{f,app}$  を持つ材料から形成されたソリッド繊維のように作用する。そして、内孔 4 2 は繊維 4 0 のみかけの弾性率を変え、かつ該みかけの弾性率を、繊維を構成している材料の固有の弾性率  $E_{f,int}$  より小さいみかけの値  $E_{f,app}$  に効果的に減少させている。別の繊維 4 4 は低弾性率の芯 4 6 を含んでおり、この芯 4 6 は繊維 4 4 を構成する材料の固有の弾性率を効果的に減少させる。更に、繊維 4 8 は屈曲部を有し、この屈曲部は繊維の引張り時の剛性をかなり減少させ、繊維のみかけの弾性率をかなり減少させている。他の繊維形態も繊維材料のみかけの弾性率を減少させるために用いることができる。例えば、繊維がボイド等を含むように形成されてもよい。

【0056】また、マトリクスも該マトリクス材料自身のもつ固有の弾性率と異なった弾性率を示すように変更することができる。例えば、マトリクス材料 5 2 中に、繊維の直径よりもかなり小さい直径を持つ微粒子のような高弾性率の充填材の微粉末 5 0 を組込んで、マトリクス材料のみかけの弾性率を増加させることができる。表 1 と図 6 から明らかなように、ガラス又は炭素のような繊維を熱可塑性ポリマー又は熱硬化ポリマーのような有機マトリクス中に組み込んだ複合体の場合、一般的に、繊維の弾性率を減少させ、マトリクスの弾性率を増加させることが望ましい。他の複合体では、弾性率  $E$  が最小範囲の低い側にあるときは、上記とは反対の変更が好ましい。繊維又はマトリクスのみかけの弾性率を変えるこれらの変更は、一方もしくは両方の成分のみかけの凝集エネルギーを変えてもよい。その結果のみかけの物性

( $E_{f,app}$ ;  $E_{m,app}$ ;  $U_{f,app}$  及び  $U_{m,app}$ ) は、純粋な繊維材料及び純粋なマトリクス材料自身の固有の物理特性によって決められる固有の節点モデル臨界縦横比  $Sc, n_{m,int}$  より小さいみかけの節点モデル臨界縦横比  $Sc, n_m$  を互いに協同して決める。上述したように、 $Sc, n_{m,int}$  と  $Sc, n_{m,app}$  は節点モデルの演算又は解析式の使用の何れかによって決定される。

【0057】勿論、本発明のある種の態様によれば、実際に計算を行わなくとも実施が可能である。例えば、適正な変更が実際に材料自身の正しい変更となるのであれば、該適正な変更は計算することなしに行い得る。上述した計算とモデルはある特定の変更が成功しているかもしくは望ましいかを決定するために使用することができる。

【0058】上述した解析式と節点モデルは、ある特定のみかけの物理特性を持つ繊維とマトリクスで構成される複合体の設計ないし製造に直接活用することができる。この複合体の製造方法は、真の繊維とマトリクスのみかけの物理特性を選択し、このような解析式及び／又は節点モデルを使用して臨界縦横比を計算すること、及び、解析式又は節点モデルで決められる予測臨界縦横比

さより大きい実際の繊維長さを求めるため該実際の繊維長さを計算することを含む。次いで、選択された繊維とマトリクスはモールド法や鑄造法のような従来の複合体製造技術によって実際の複合体へ組込まれる。

【0059】上述した解析的臨界縦横比及び節点モデル臨界縦横比は希薄複合体の仮定を用いて導出される。濃度の大きいマルチ繊維複合体の実際の臨界縦横比は節点モード臨界縦横比にスケールファクター、典型的には約 2 4 を乗ずることにより最もよく近似される。そして、繊維が有効に用いられることを保証するために、濃度の大きい複合体中の実際の繊維の縦横比は約 2 4 ( $Sc, n_m$ ) 以上であるのが望ましい。好ましくは、実際の繊維の縦横比は 3 0 ( $Sc, n_m$ ) 未満である。この点に関して、希薄複合体に対する最小臨界縦横比を与える  $E$  と  $U$  の値は、濃度の大きい複合体においても有効に運用できるということは注意すべきことである。つまり、上記のように希薄化された希薄複合体で最小  $Sc$  を与える物性は濃度の大きい複合体でも最小  $Sc$  を与える。

【0060】上述の節点モデルは、示された好適な節点モデルに用いられたある種の仮定を省略しても変形することができる。例えば、節点モデルは、より多くの繊維を表わすより多くの節点を組込むことにより、濃度の大きいマルチ複合体をより近くシミュレートすべく変形させることができる。しかし、これは、モデルを実施するために必要なコンピュータ処理時間をかなり増加させる効果となる。また、節点モデルは、マトリクスと繊維との間に、マトリクスや繊維とは明らかに性質の異なる中間相の如き付加的な相を組込んで変更することができる。この場合、中間相によって占められる複合体の領域をシミュレートするモデルにおけるボンド及び角度は式 XI 及び式 XII 中の適切な  $E_a$  及び  $c$  の値としてあてがわれる。また、図 4 に示された節点の特定の幾何学的な配置は好ましいものであるが、これに限定されるものではない。他の数学的に等価な配置を使用してもよい。そのような任意の他の配置についても、式 XII に相当する式が、形は異なるが使用される。また、本モデルは、好ましくはデジタルコンピュータで実行されるが、他のモデル技術を用いることもできる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】複合体の概略断面図である。

【図 2】破壊のモードを示す理想化された複合体の該略図である。

【図 3】本発明の実施例において使用されるある関係を示すグラフである。

【図 4】本発明の別の実施例において使用されるモデルの一部を示す図である。

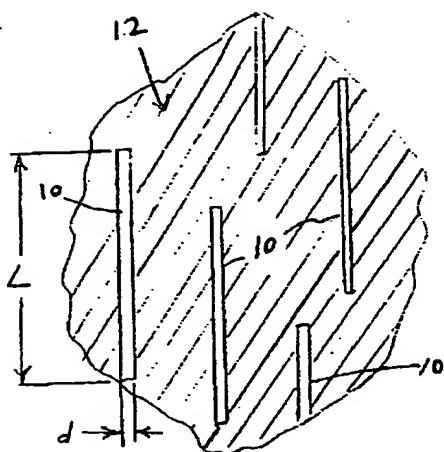
【図 5】図 4 のモデルの演算フローチャートである。

【図 6】本発明のある実施例により使用される別の関係を示すグラフである。

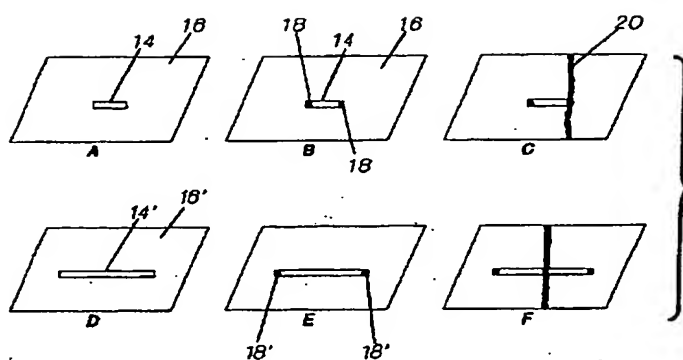
【図 7】本発明の更に別の実施例による複合体を示す、

図1と同様の図である。

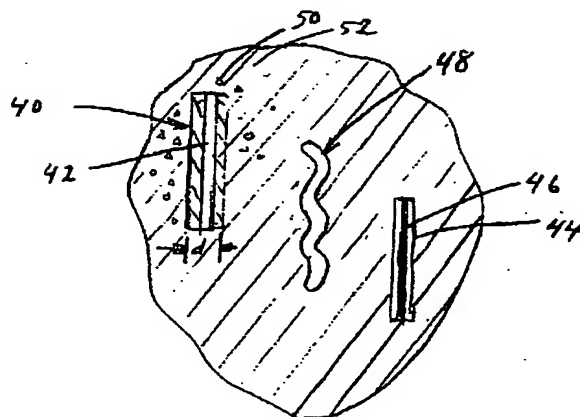
【図1】



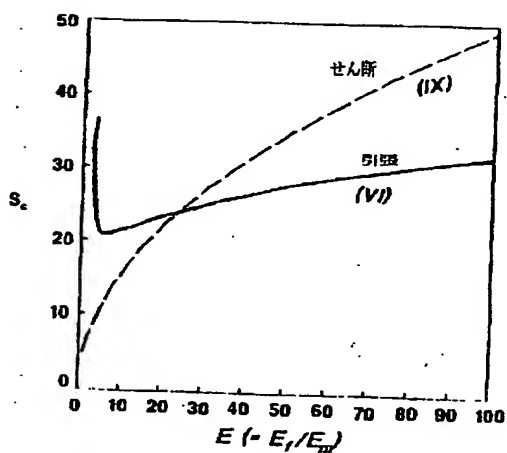
【図2】



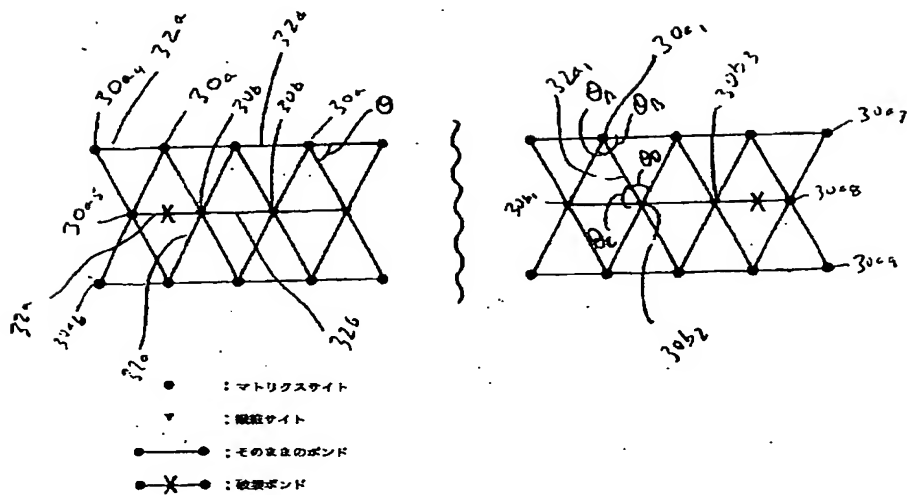
【図7】



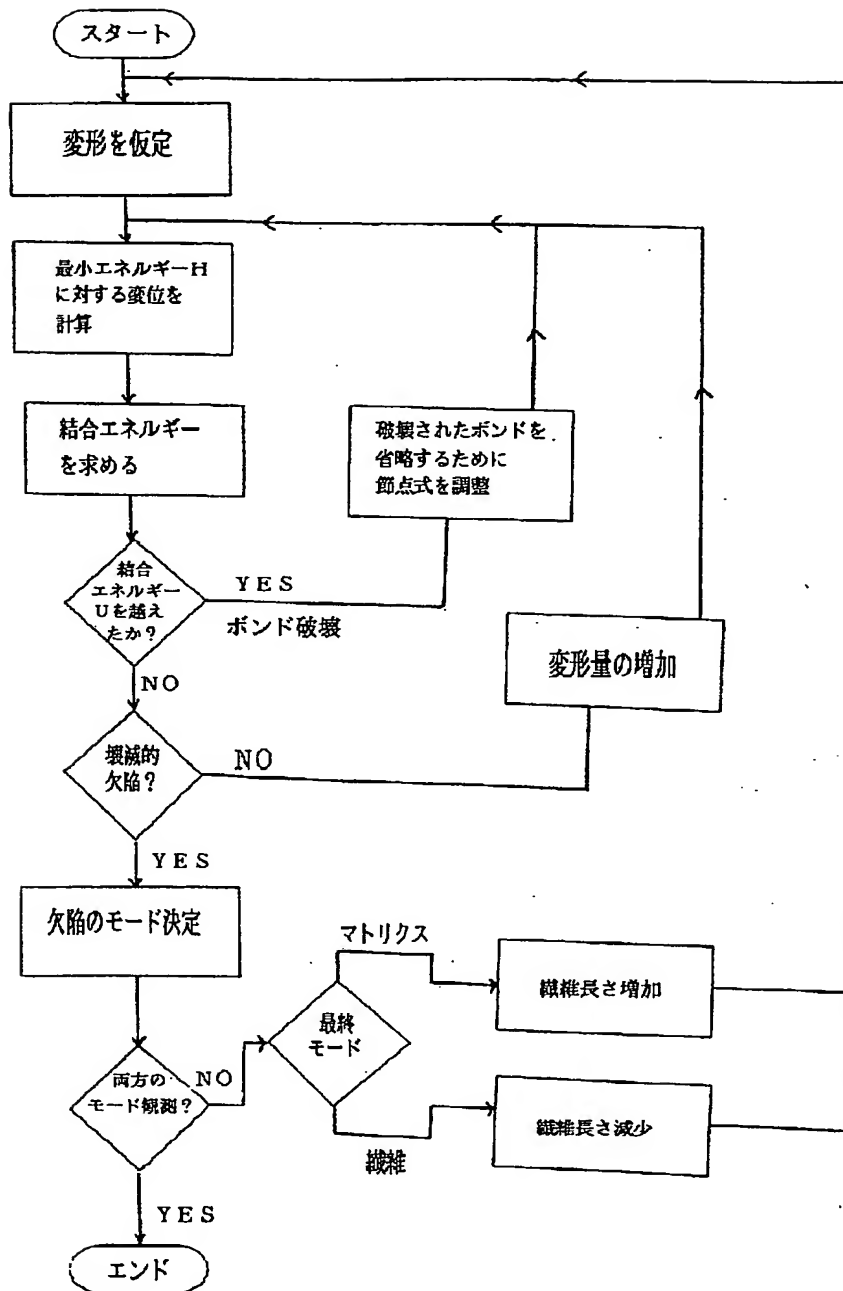
【図3】



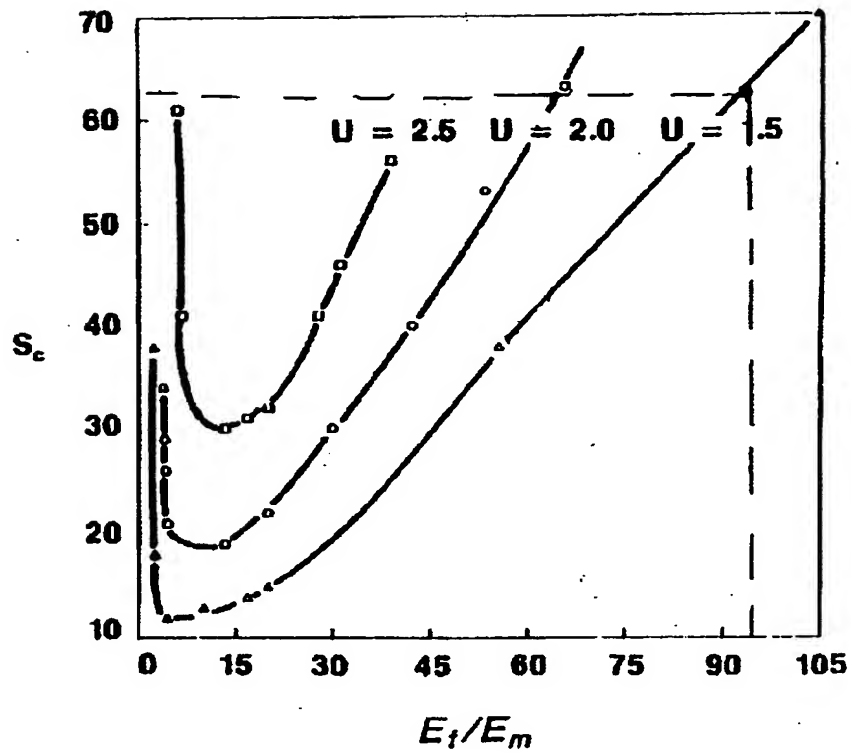
【図4】



【図5】



【図6】



【手続補正書】

【提出日】平成4年10月26日

【手続補正1】

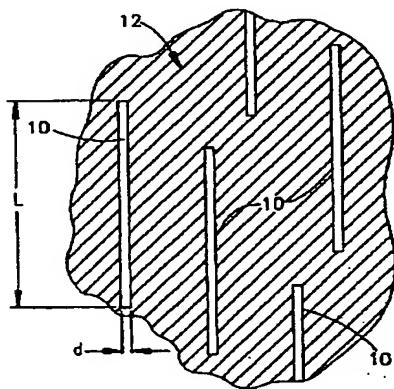
【補正対象書類名】図面

【補正対象項目名】全図

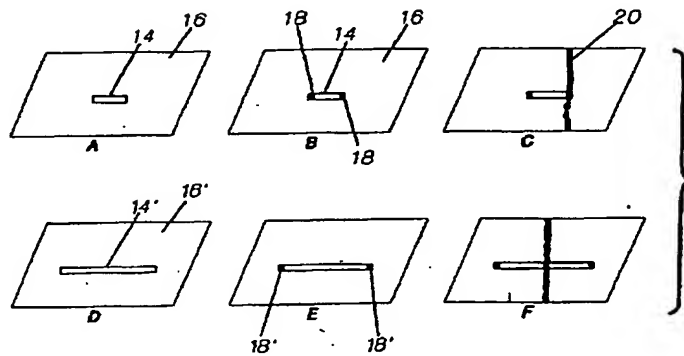
【補正方法】変更

【補正内容】

【図1】

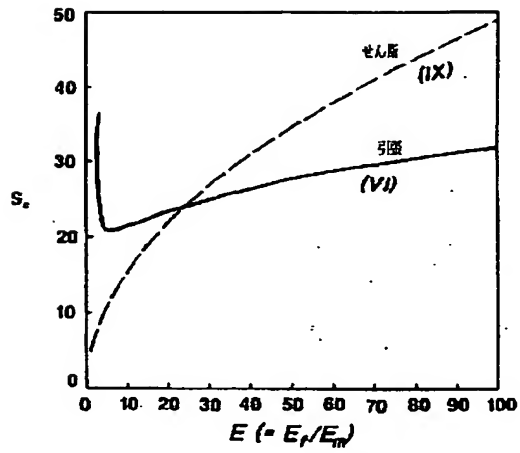


【図2】

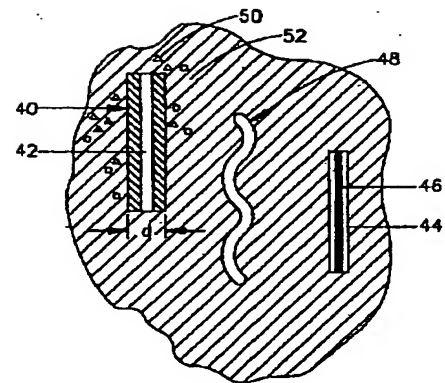




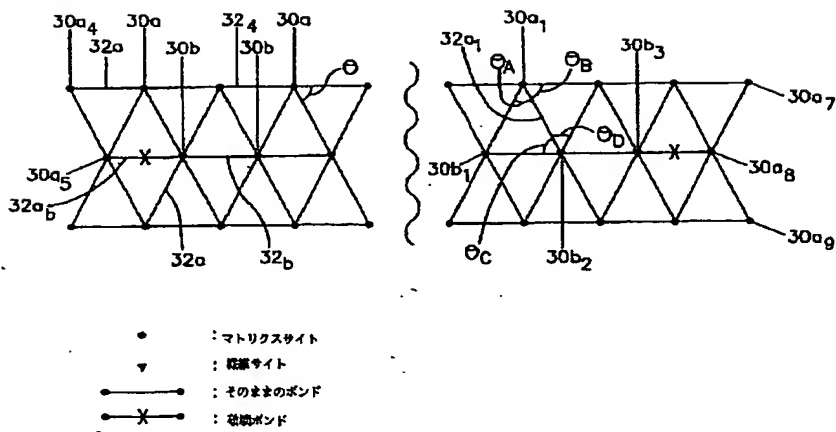
【図 3】



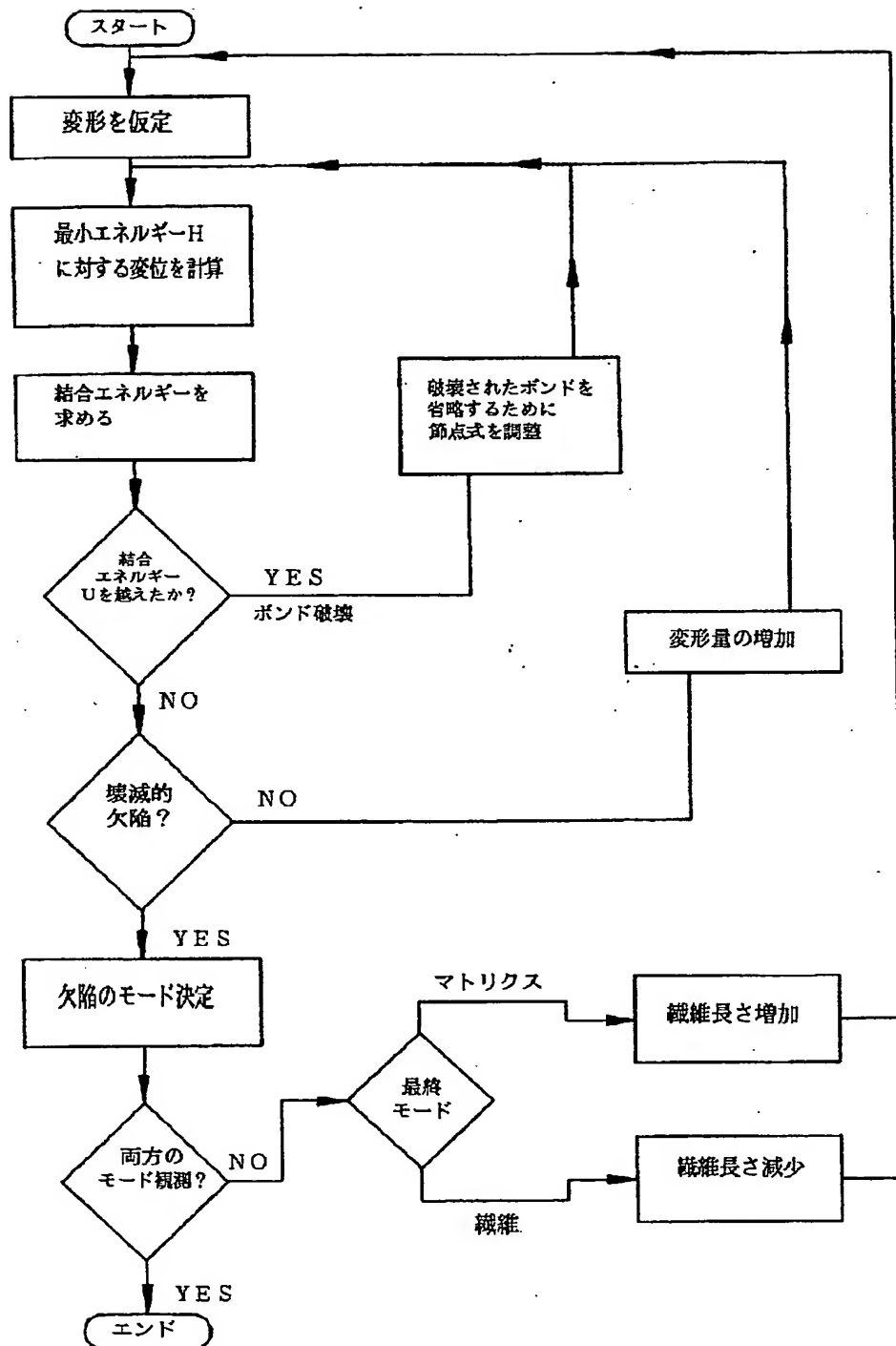
【図 7】



【図 4】

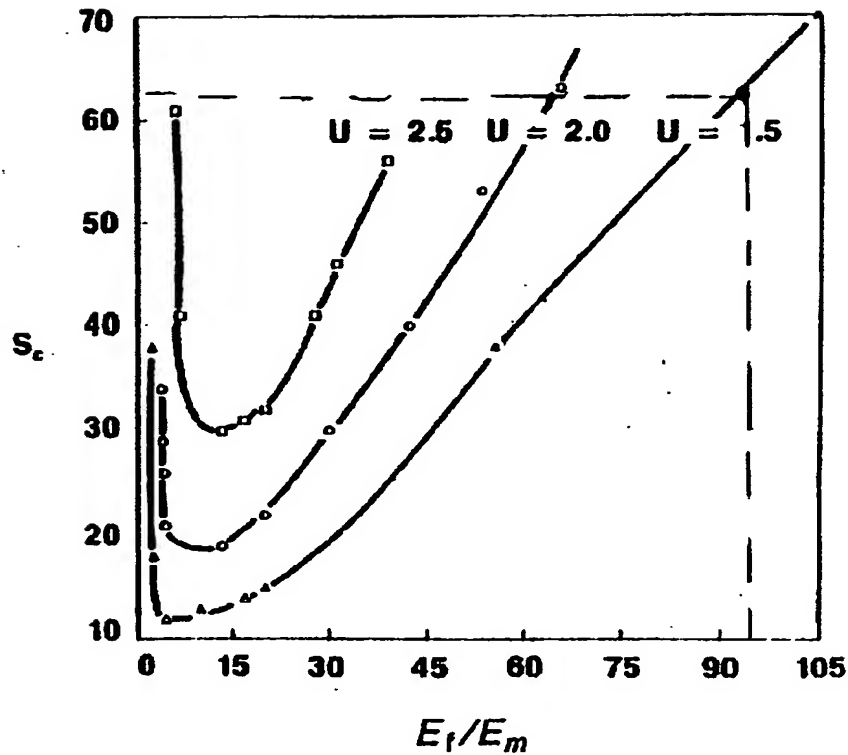


【図 5】



BEST AVAILABLE COPY

【図 6】



フロントページの続き

(72)発明者 リサ マリー—アンドリー モネット  
 アメリカ合衆国、ニュージャージー州、フ  
 レミントン、ハンター ヒルズ 1-10  
 (72)発明者 ジョン ビー. ディスミュークス  
 アメリカ合衆国、ニュージャージー州、ア  
 ナンダール、ハムデン ロード 216

(72)発明者 シュン リン  
 アメリカ合衆国、ニュージャージー州、サ  
 マービル、ファーム ロード 32-9  
 (72)発明者 デイビッド ジョジフ スロロビッチ  
 アメリカ合衆国、ミシガン州、アン アー  
 バー、グランガー アベニュー 1518